

# Tuulivoimaloiden melutason mittaaminen altistuvassa kohteessa

RAKENNETTU  
YMPÄRISTÖ

Mätning av bullernivån från vindkraftverk vid objekt som utsätts





# Tuulivoimaloiden melutason mittaaminen altistuvassa kohteessa

**Mätning av bullernivån från vindkraftverk vid objekt som utsätts**



Ympäristöministeriö  
Miljöministeriet  
Ministry of the Environment

YMPÄRISTÖHALLINNON OHJEITA 4 | 2014

Ympäristöministeriö

Rakennetun ympäristön osasto

Taitto: Marianne Laune

Kansikuva: Mikko Korhonen / YHA-Kuvapankki

Julkaisu on saatavana vain internetistä:

[www.ym.fi/julkaisut](http://www.ym.fi/julkaisut)

Helsinki 2014

ISBN 978-952-11-4277-2 (PDF)

ISSN 1796-1653 (verkkokj.)

## ESIPUHE

Ympäristöministeriö antaa seuraavan ohjeen tuulivoimaloiden melutason mittaamisesta altistuvassa kohteessa. Ohje annetaan ympäristönsuojelulain (86/2000) 108 §:n ja 117 §:n nojalla. Ohje tulee voimaan 28.2.2014 ja on voimassa toistaiseksi.

Melu on ympäristönsuojelulain (86/2000) 3 §:ssä tarkoitettu ympäristön pilaantumista aiheuttava päästö. Lain 5 §:n mukaan toiminnan harjoittajan on oltava riittävästi selvillä toimintansa ympäristövaikutuksista, ympäristöriskeistä ja haitallisten vaikutusten vähentämismahdollisuuksista (*selvilläolovelvollisuus*). Lain 25 §:n mukaan kunnan on alueellaan huolehdittava paikallisten olojen edellyttämästä tarpeellisesta ympäristön tilan seurannasta.

Maankäyttö- ja rakennuslain (132/1999) 5 §:n mukaan alueidenkäytön suunnittelun tavoitteena on edistää mm. turvallisen, terveellisen ja viihtyisän elin- ja toimintaympäristön luomista. Alueidenkäytössä, perustuen kaavojen sisältövaatimuksiin, on ehkäistävä melusta, tärinästä ja ilman epäpuhtauksista aiheutuvaa haittaa ja pyrittävä vähentämään jo olemassa olevia haittoja.

Tuulivoimaloiden melun mittausohje on tarkoitettu ohjeeksi arvioitaessa tuulivoimaloiden tuottamaa melukuormitusta ympäristönsuojelulain täytäntöönpanossa ja soveltamisessa, sekä maankäyttö- ja rakennuslain mukaisissa menettelyissä.

Ylijohtaja  
Helena Säteri

Ympäristöneuvos  
Ari Saarinen



## SISÄLLYS

|  |    |
|--|----|
| <b>Esipuhe</b> .....   | 3  |
| <b>I Johdanto</b> .....  | 7  |
| <b>2 Sovellusala</b> .....   | 8  |
| <b>3 Määritelmiä</b> .....   | 9  |
| <b>4 Mittauslaitteisto</b> .....   | 12 |
| 4.1 Äänitekniset laitteet.....   | 12 |
| 4.2 Tuulisuoja.....  | 12 |
| 4.3 Mittauslevy.....   | 13 |
| 4.4 Ympäristöolosuhteita mittaavat laitteet.....   | 14 |
| <b>5 Mittaaminen</b> .....   | 15 |
| 5.1 Mittausmenettelyt.....   | 15 |
| 5.2 Mittauspisteet.....  | 17 |
| 5.3 Tuulen nopeuden määrittäminen tuulivoimalan kohdalla.....                                | 17 |
| 5.3.1 Tuulen nopeuden määrittäminen tuulivoimalan sähkötehon ja tehokäyrän avulla.....       | 17 |
| 5.3.2 Tuulen nopeuden määrittäminen moottorikotelon päälle asennetun anemometrin avulla..... | 18 |
| 5.3.3 Tuulen nopeuden määrittäminen 10 m korkeudelle sijoitetun anemometrin avulla.....      | 18 |
| 5.3.4 Eri korkeuksilla mitattujen tuulen nopeuksien normalisointi.....                       | 18 |
| 5.4 Tuulen nopeuden ja suunnan mittaaminen mittauspisteen kohdalla.....                      | 19 |
| 5.5 Mittausten aikana vallitsevat sääolot.....   | 19 |
| 5.6 Mittausten suorittaminen.....  | 20 |
| 5.6.1 Menettely A.....   | 20 |
| 5.6.2 Menettely B.....   | 20 |
| 5.6.3 Menettely C.....   | 20 |
| 5.7 Taustamelukorjaus.....   | 21 |
| 5.8 Mittaukset korkean taustamelutason vallitessa.....                                       | 21 |
| 5.8.1 Mittauksen ajankohdan siirtäminen.....   | 22 |
| 5.8.2 Mikrofonin sijainnin muuttaminen.....  | 22 |
| 5.8.3 Kaksiosaisen tuulisuojan käyttäminen.....  | 22 |
| 5.8.4 Mittauslevyn käyttäminen.....  | 22 |
| 5.8.5 Mittaukset pienemmän tuulen nopeuden vallitessa.....                                   | 23 |
| 5.8.6 Mittaukset lähempänä tuulivoimalaa.....  | 23 |
| 5.9 Pienitaajuisen melun mittaaminen.....  | 24 |
| 5.10 Melun kapeakaistaisuuden määrittäminen.....   | 24 |
| 5.10.1 Mittauspisteet.....   | 24 |
| 5.10.2 Menetelmä 1.....  | 24 |
| 5.10.3 Menetelmä 2.....  | 25 |
| 5.11 Melun impulssimaisuuden määrittäminen.....  | 25 |
| 5.12 Melun merkityksellisen sykinnän (amplitudimodulaatio) määrittäminen.....                | 25 |
| 5.13 Mittaukset sisätiloissa.....  | 27 |
| <b>6 Mittausten raportointi</b> .....  | 28 |
| <b>Viitteet</b> .....  | 33 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Förord</b>  | 35 |
| <b>1 Inledning</b>   | 37 |
| <b>2 Tillämpningsområde</b>  | 38 |
| <b>3 Definitioner</b>  | 39 |
| <b>4 Mätapparatur</b>  | 42 |
| 4.1 Ljudtekniska apparater   | 42 |
| 4.2 Vindskydd  | 43 |
| 4.3 Mätskiva   | 43 |
| 4.4 Apparater som mäter miljöförhållanden  | 44 |
| <b>5 Mätning</b>   | 45 |
| 5.1 Mätmetoder   | 45 |
| 5.2 Mätpunkter   | 47 |
| 5.3 Bestämning av vindhastigheten vid vindkraftverket                                      | 47 |
| 5.3.1 Bestämning av vindhastigheten med hjälp av vindkraftverkets eleffekt och effektkurva | 47 |
| 5.3.2 Bestämning av vindhastigheten med hjälp av en anemometer monterad på motorkåpan      | 48 |
| 5.3.3 Bestämning av vindhastigheten med hjälp av en anemometer placerad på 10 meters höjd  | 48 |
| 5.3.4 Normalisering av vindhastigheter uppmätta på olika höjder                            | 48 |
| 5.4 Mätning av vindens hastighet och riktning vid mätpunkten                               | 49 |
| 5.5 Rådande väderförhållanden under mätningarna  | 49 |
| 5.6 Mätningarnas utförande   | 50 |
| 5.6.1 Metod A  | 50 |
| 5.6.2 Metod B  | 50 |
| 5.6.3 Metod C  | 51 |
| 5.7 Korrigering för bakgrundsbuller  | 51 |
| 5.8 Mätningar när bakgrundsbullrets nivå är hög  | 52 |
| 5.8.1 Ändring av tidpunkten för mätningen  | 52 |
| 5.8.2 Ändring av mikrofonens placering   | 52 |
| 5.8.3 Användning av ett tvådelat vindskydd   | 52 |
| 5.8.4 Användning av en mätskiva  | 52 |
| 5.8.5 Mätningar vid lägre vindhastighet  | 53 |
| 5.8.6 Mätningar närmare vindkraftverket  | 53 |
| 5.9 Mätning av lågfrekvent buller  | 54 |
| 5.10 Bestämning av bullrets smalbandighet  | 54 |
| 5.10.1 Mätpunkter  | 54 |
| 5.10.2 Metod 1   | 54 |
| 5.10.3 Metod 2   | 55 |
| 5.11 Bestämning av bullrets impulsart  | 55 |
| 5.12 Bestämning av bullrets signifikanta pulserande (amplitudmodulering)                   | 55 |
| 5.13 Mätningar inomhus   | 57 |
| <b>6 Rapportering av mätningarna</b>   | 58 |
| Hänvisningar   | 63 |
| Kuvailulehti   | 64 |
| Presentationsblad  | 65 |
| Documentation Page   | 66 |



# 1 Johdanto

Tässä ohjeessa esitetään menettelytavat tuulivoimalan tai tuulivoima-alueen tuulivoimaloiden aiheuttaman melutason mittaamiseksi ja arvioimiseksi melulle altistuvassa kohteessa.

Tuulivoimaloiden melun mittaaminen poikkeaa muun ympäristömelun mittaamisesta [2]. Kovan tuulen ja mahdollisen voimakkaan taustamelun vuoksi etäällä tuulivoimalasta tehtävät melutason mittaukset (immissiomittaukset) eivät välttämättä ole mahdollisia. Tuulivoimaloiden ääni voi sisältää pientaajuisia komponentteja ja se voi olla impulssimaista, kapeakaistaista tai merkityksellisesti sykkivää (amplitudimodulaatio). Tuulivoimaloiden tuottama ääni ja äänenvoimakkuus vaihtelevat merkittävästi ajallisesti. Voimala toimii nimellistehollaan, jolloin sen melupäästö on suurin, vain osan toiminta-ajastaan.

Ohjeessa annetaan tietoja mittausmenettelyistä, mittauksissa käytettävistä laitteista ja tulosten esittämistavasta. Mittaukset voidaan tehdä kaikissa suunnissa tuulivoimalan (tai tuulivoimalaryhmän) ympärillä.

Melutaso (meluimmissio) määritetään A-painotettuna äänenpainetasona (äänitaso) ja tarvittaessa myös taajuuskaistoittain. Mittaustulosten toistettavuuden parantamiseksi ja vertailtaessa tuloksia mallinnustuloksiin on välttämätöntä, että mittaukset tehdään tiettyjen äänen etenemisolojen (sääolosuhteiden) vallitessa.

Sisätilojen pienitaajuinen melutaso voidaan arvioida mittaamisen lisäksi myös laskennallisesti perustuen tarkasteltavan tuulivoimalan melupäästöön, äänen etenemiseen tuulivoimalasta tarkasteltavan rakennuksen vaipan ulkopinnalle sekä rakennuksen vaipan ääneneristykseen mikäli riittävät lähtötiedot ovat käytettävissä. Arvio rakennuksen vaipan ääneneristävydestä voi perustua mittaustulokseen, laskentaan tai vertailuun tunnetun rakenteen tai rakennusosan ilmaaääneneristävydestä.

Tuulivoimaloiden melutason mittaaminen ja analysointi edellyttävät akustiikan erityisosaamista ja kokemusta ympäristömelun mittaamisesta, jotta tulokset olisivat luotettavia, jäljitettäviä ja vertailukelpoisia.

## 2 Sovellusala

Mittausohjetta voidaan käyttää melun suunnittelu- ja tunnusarvojen (ohje ja raja-arvot) täyttymisen, sekä melumallinnuksella saatujen tulosten vertailuun ohjeessa esitetyn rajoituksin. Mittaukset tehdään tällöin ohjeessa esitettyjen sääolosuhteitten vallitessa.

Ohjeen mukaisin menetelmin on lisäksi mahdollista selvittää melun mahdollinen kapeakaistaisuus, impulssimaisuus tai merkityksellinen sykintä (amplitudimodulaatio). Ohjetta voidaan lisäksi hyödyntää sellaisenaan tai yhdessä muun ääniteknisen viranomaisohjeistuksen kanssa tilanteissa, joissa tuulivoimaloiden melu aiheuttaa häiriötä ympäristössä tai rakennusten sisällä. Mittaukset tehdään tällöin niiden sääolosuhteitten vallitessa, kun melun aiheuttama häiriö on havaittavissa.

Ohjeessa esitettyjä menettelyjä sovelletaan tilanteissa, joissa luotettavien äänitasomittausten tekeminen melun leviämislle suotuisissa olosuhteissa on mahdollista melulle altistuvassa kohteessa.

Voimakas taustamelu saattaa pienentää mittauksen signaali-kohinasuhdetta, mikä heikentää mittaustuloksen luotettavuutta. Tuulivoimaloiden melutaso voidaan määrittää tuolloin mittamalla tuulivoimalan melupäästö (ääniteho) tätä tarkoitusta varten laaditun ohjeen mukaisesti ja laskemalla tarkastelupisteissä vallitsevat melutasot perustuen mitattuun melupäästöön ja ympäröivän maaston ominaisuuksiin [3]. Koska menettelytapa (todentaminen) vastaa tai voi vastata melumallinnusta (mitoitus), tulosta ei ole mahdollista, ilman riittävää ääniteknistä tarkastelua, suoraan käyttää melun suunnittelu- ja tunnusarvojen (ohje ja raja-arvot) täyttymisen todentamiseen. Riittävä äänitekninen tarkastelu tarkoittaa tuloksen luotettavuuden ja edustavuuden arviointia ja sen raportointia.

## 3 Määritelmiä

### Äänenpaine $p$ [Pa]

Äänen liittyvä hetkellisen paineen ja staattisen ilmanpaineen ero, yleensä tehollisarvona.

### A-painotettu äänenpaine $p_A$ [Pa]

Äänenpaine määritettynä A-taajuuspainotusta käyttäen, yleensä tehollisarvona.

### Äänenpainetaso $L_p$ [dB]

Äänenpaineen tehollisarvon ja vertailuäänepaineen suhteen neliön kymmenkertainen kymmenlogaritmi.

### Äänitaso $L_{pA}$ [dB]

Hetkellisen A-painotetun äänenpaineen tehollisarvon ja vertailuäänepaineen suhteen neliön kymmenkertainen kymmenlogaritmi.

### Keskiäänitaso (ekvivalentti äänitaso, ekvivalenttitaso) $L_{Aeq}$ [dB]

A-painotetun äänenpaineen keskimääräistä tehollisarvoa määritetyllä aikavälillä ( $T$ ) vastaava äänitaso ( $L_{Aeq,T}$ ). Keskiäänitaso määritellään yhtälöllä

$$L_{Aeq,T} = 10 \lg \left( \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} 10^{\frac{L_{pA}(t)}{10}} dt \right) = 10 \lg \left( \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right),$$

missä

$t_1$  on määrittelyn aikavälin  $T$  alkuhetki

$t_2$  on määrittelyn aikavälin  $T$  loppuhetki

$L_{pA}(t)$  on tarkasteltavan äänen äänitason hetkellisarvo [dB]

$p_A(t)$  on tarkasteltavan äänen A-painotetun äänenpaineen hetkellisarvo [Pa]

$p_0$  on vertailuäänepaine 20  $\mu$ Pa.

**Melutaso (meluimmissio)  $L_{pA}$  [dB]**

Melulle altistuvan kohteen äänitaso.

**Pienitaajuinen melu**

Pientaajuisella melulla tarkoitetaan tässä taajuusalueella 20–200 Hz esiintyvää melua. Alle 20 Hz taajuuksilla esiintyvää ääntä kutsutaan infraääneksi.

**Taustamelu**

Muu kuin tuulivoimalan synnyttämä (mitattava) melu.

**Signaali-kohinasuhde**

Signaali-kohina suhdetta käytetään kuvaamaan halutun signaalin (esimerkiksi tuulivoimalan äänen) erottuvuutta taustakohinasta (esimerkiksi virtauksen kasvustossa aiheuttama kohina). Mitä parempi signaali-kohinasuhde on, sitä vähemmän kohina häiritsee mittauksia.

**Suunnittelu- ja tunnusarvot**

Melun suunnittelu- ja tunnusarvoilla tarkoitetaan tässä ohjeessa melun raja- tai ohjearvoja, jotka perustuvat lainsäädäntöön, ympäristölupaan tai viranomaisohjeistukseen.

**Melupäästö (meluemissio)**

Tuulivoimalan tai tuulivoima-alueen samanlaisten tuulivoimaloiden äänitehotaso.

**Melun erityispiirteet**

Melun erityispiirteet ovat niitä äänen aika- tai taajuuskäyttäytymiseen liittyviä piirteitä, jotka lisäävät melun häiritsevyyttä melulle altistuvalla alueella. Melun erityispiirteitä ovat mm. kapeakaistaisuus, tonaalisuus, impulssimaisuus ja merkityksellinen sykintä.

**Melun kapeakaistaisuus ja tonaalisuus**

Tonaalisuudella tarkoitetaan tässä yhden tai useamman äänksen äänenpainetason ja peitto-äänen tason erotusta kriittisellä kaistalla äänksen (äänksien) ympärillä.

Melu on kapeakaistaista tai tonaalista, jos siinä on kuulohavainnoin erotettavissa olevia melun haitallisuutta lisääviä äänksiä tai kapeakaistaisia komponentteja melulle altistuvalla alueella. Kapeakaistaisuus todetaan viitteen [11] mukaisella menettelyllä.

**Äänes**

Yksittäisestä taajuudesta syntynyt ääni. Ääni, jonka äänenpaine vaihtelee sinimuotoisesti ajan funktiona.

**Taajuuskaista, taajuusväli**

Kahden taajuuden suhde tai erotus.

**Melun impulssimaisuus**

Melu on impulssimaista, jos siinä on kuulohavainnoin erotettavissa olevia melun haitallisuutta lisääviä lyhytkestoisia ääniä (transientteja) melulle altistuvalla alueella. Impulssimaisuus todetaan viitteen [13] mukaisella menettelyllä.

**Melun merkityksellinen sykintä eli amplitudimodulaatio (excess amplitude modulation)**

Melu on merkityksellisesti sykkivää eli amplitudimoduloitunutta, jos siinä on kuulohavainnoin erotettavissa olevia melun haitallisuutta lisääviä äänenvoimakkuuden ajallisia jaksollisia vaihteluja melulle altistuvalla alueella. Merkityksellinen sykintä todetaan viitteen [14] mukaisella menettelyllä.

**Sanktio**

Sanktiolla tarkoitetaan toimenpidettä, missä melun impulssimaisuuden, kapeakaistaisuuden tai merkityksellisen sykkinnän (äänenvoimakkuuden ajallinen vaihtelu, amplitudimodulaatio) vuoksi mittauksista lisätään säädöksessä annettu lukuarvo (esimerkiksi 5 dB) ennen sen vertaamista suunnittelu- tai tunnusarvoon.

**Tuulen nopeuden tavoitearvo**

Tuulen nopeus, jonka vallitessa äänenpainetaso halutaan mitata. Tuulen nopeuden tavoitearvo vastaa mittauksissa sitä tuulivoimalan napakorkeudella vallitsevaa tuulen nopeutta, joka tuottaa tuulivoimalan nimellisteholla enimmäismelupäästön.

## 4 Mittauslaitteisto

### 4.1

#### Äänitekniset laitteet

Ääniteknisen mittauslaitteiston (mukaan lukien mahdollisesti käytettävät vaihtoehtoiset laitteistot ja lisälaitteet, esimerkiksi tallennuslaitteet) tulee täyttää standardin IEC 61672-1 [10] vaatimukset tarkkuusluokan 1 äänitasomittareille. Oktaavi- tai terssikaistoittain tehtäviin mittauksiin käytettävien laitteistojen tulee täyttää standardin IEC 61260 [9] vaatimukset.

Mittauksissa käytettävän mikrofonin halkaisija saa olla enintään 13 mm.

Mittauslaitteiden toiminta tulee tarkistaa ja tarvittavat säädöt tehdä ulkoista kalibrointi-äänilähdettä käyttäen. Kalibrointiäänilähteen tulee täyttää standardin IEC 60942 [8] vaatimukset. Kalibrointi tulee tehdä ennen jokaista mittaussarjaa ja mittausten jälkeen. Poikkeama ennen mittauksia ja mittausten jälkeen tehtyjen kalibrointitulosten välillä ei saa ylittää 0,2 dB. Mikäli kalibrointiarvojen ero ennen mittauksia ja mittausten jälkeen on suurempi kuin 0,2 dB, mittaukset tulee uusida. Kalibroinnissa koko mittaus- ja tallennuslaitteistoketju on kalibroitava. Esimerkiksi mikrofonin jatkokaapelin vaikutus on otettava huomioon. Kalibroinnin tulee tapahtua valmistajan ohjeiden mukaisesti. Kalibraattori on tarkistettava vähintään kahden vuoden välein ja tulosten on oltava jäljitettäviä.

Mikäli tulostuslaitteisto on osa mittaustuloksiin vaikuttavaa ketjua, myös tulostuslaitteisto kuuluu kalibroinnin piiriin.

Mittauksissa ja mittausten analysoinnissa käytettävät laitteet, myös oktaavi- ja terssisuodattimet kuvataan mittausraportissa. Kuvaus sisältää mm. laitetyypit ja kalibroinnit, sekä selvityksen näytteenottomenetelmästä (luku 6). Laitteita on käytettävä valmistajan ohjeiden mukaisesti.

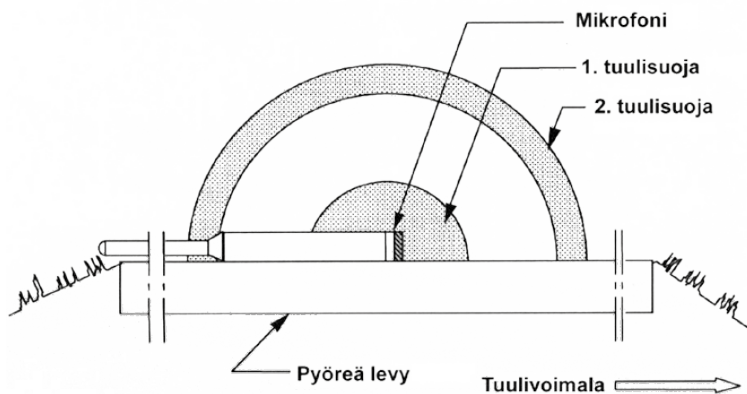
### 4.2

#### Tuulisuoja

Mittausten tarkoituksesta ja mittauspaikan ominaisuuksista riippuen, mikrofoni voidaan asettaa mikrofonitelineeseen tai maanpinnalle sijoitetulle mittauslevylle.

Telineeseen asetetun mikrofonin tuulisuojana käytetään laitevalmistajan suosittelemaa primääristä tuulisuojaa. Tarvittaessa käytetään tämän ympärille asetettua toista tuulisuojaa.

Mittauslevyn päälle asetetun mikrofonin ympärille sijoitetaan tuulisuoja (1. tuulisuoja) kuvan 1 mukaisesti ja tarvittaessa käytetään lisäksi toista tuulisuoja (2. tuulisuoja).



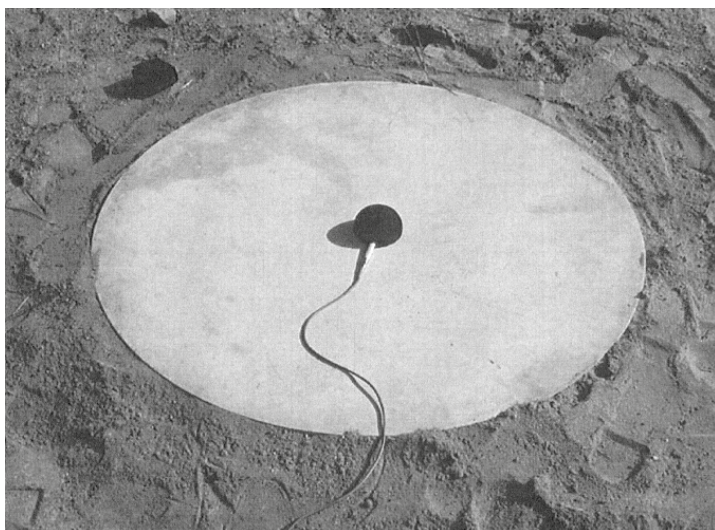
Kuva 1. Pyöreä levy, jolle on asetettu mikrofoni tuulisuojiin [11].

Tuulisuojan vaikutus mikrofoniin taajuusvasteeseen on esitettävä mittausraportissa.

#### 4.3

### Mittauslevy

Tuulen aiheuttaman kohinan pienentämiseksi mikrofoni voidaan sijoittaa maan pinnalle asetetun akustisesti kovasta materiaalista tehdyn levyn päälle kuvan 2 mukaisesti. Levyn tulee olla ensisijaisesti ympyränmuotoinen ja sen halkaisijan tulee olla ainakin 1,0 m. Mikrofonin sijoitetaan mahdollisimman lähelle levyn pintaa.



Kuva 2. Mikrofonin sijoitus pyöreän levyn päälle [11].

## Ympäristöolosuhteita mittaavat laitteet

Tuulen nopeuden mittaamiseen käytetään laitteita, joiden tarkkuus on vähintään  $\pm 0,2$  m/s alueella 4 m/s–12 m/s. Laitteilla tulee voida mitata samanaikaisesti keskimääräistä tuulen nopeutta synkronoituna äänitason mittaamisen kanssa.

Tuulen suunnan mittaukseen käytettävien laitteiden tarkkuuden tulee olla vähintään  $\pm 5^\circ$  ja lämpötilan mittaukseen vähintään  $\pm 1$  °C.

Suhteellisen kosteuden mittaamisen käytettävien laitteiden tarkkuuden tulee olla vähintään  $\pm 2$  % ja ilmanpaineen mittaamiseen vähintään  $\pm 1$  kPa.



## 5 Mittaaminen

Tuulivoimaloiden melutason arviointiin altistuvassa kohteessa käytetään ensisijaisesti tätä ohjetta. Lisäksi noudatetaan soveltuvien osin viitteen [2] ohjeistusta ympäristömelun mittaamisesta.

Mitattava suure on aikaa  $T$  vastaava keskiäänitaso  $L_{Aeq,T}$ . Raportoitava tulos määritetään lyhytaikaisten (yleensä 1 minuuttia kestävien) eri tuulen nopeuksilla mitattujen äänenpainetasojen perusteella.

Tuulivoimalan melun mittaamista voi rajoittaa tuulen aiheuttama taustamelu, kuten:

- tuulikohina mikrofonissa;
- virtauksen synnyttämä ääni kasvustossa (puut, pensaat) ja rakenteissa;
- tuulen aiheuttamista aalloista ja veden virtauksesta syntyvä ääni.

Näiden lisäksi taustamelua voi aiheutua myös muista ääntä tuottavista lähteistä, kuten liikenteestä, teollisuudesta, ihmisten toiminnasta, joka tulee ottaa huomioon mittauksessa tai mittaustulosten käsittelyssä (taustamelukorjaus).

Keskiäänitason  $L_{Aeq,T}$ -mittauksissa oletetaan, että tuulivoimalan tuottama ääni on voimalan sijaintipaikalla vallitsevan tuulen nopeuden funktio ja että taustamelu on mittauspisteessä vallitsevan tuulen nopeuden funktio.

Tuulen nopeus voidaan ilmoittaa joko tuulen nopeutena 10 m korkeudessa tai tuulivoimalan napakorkeudella. Tuulen nopeuden tavoitearvona käytetään 10 m korkeudella vallitsevaa 8 m/s nopeutta, mikäli muita tuulennopeuksia ei ole mittauksissa perustellusti edellytetty ja arvio äänenpainetasosta 8 m/s nopeutta vastaavalla tavoitearvolla voidaan luotettavasti antaa.

### 5.1

#### Mittausmenettelyt

Tuulivoimalan tuottama melutaso voi olla samaa suuruusluokkaa ja joissakin tapauksissa jopa pienempi kuin taustamelutaso. Seuraavassa on esitetty kolme menettelyä tuulivoimalan tai tuulivoima-alueen tuulivoimaloiden melun mittaamiseksi eri tilanteissa. Menettelyistä valitaan tarkoituksenmukaisin mittauksen tavoitteen saavuttamiseksi.

**Menettely A: Tuulivoimalan melutason mittaaminen.**

Tuulivoimalan ja taustamelua tuottavien äänilähteiden melutaso mitataan eri tuulen nopeuksilla. Tuulen nopeus ja melutaso mitataan samanaikaisesti ja samassa paikassa. Tämän jälkeen tuulivoimala pysäytetään ja taustamelutaso, sekä tuulen nopeus mitataan samanaikaisesti. Mittaustuloksista määritetään tuulivoimalan tuottama melutaso.

Mittaustulosta voidaan käyttää esimerkiksi verrattaessa tuulivoimalan tuottamaa melutasoa suunnittelu- tai tunnusarvoon.

**Menettely B: Tuulivoimalan ja taustamelun yhdessä tuottaman melutason mittaaminen tuulen nopeuden tavoitearvolla.**

Tuulivoimalan ja taustamelulähteiden yhdessä tuottama melutaso mitataan mittauspisteessä. Tuulen nopeus mitataan tuulivoimalan kohdalla käyttämällä joko anemometriä tai määrittämällä se tuulivoimalan sähkötehon ja tehokäyrän avulla. Tuulen nopeus muutetaan vastaamaan 10 metrin tai tuulivoimalan napakorkeutta. Melutaso mitataan eri tuulen nopeuksilla ja mittaustulokset esitetään pisteittäin korjatun tuulen nopeuden funktiona. Melutasopisteet approksimoidaan suoralla viivalla ja tuulen tavoitearvolla vallitseva melutaso luetaan viivalta.

Menettelyllä saatua lukuarvoa voidaan pitää tuulivoimalan tuottaman melutason ylärajana tuulen nopeuden tavoitearvolla. Mitattua tulosta voidaan käyttää todentamaan, että tuulivoimalan tuottama melutaso on pienempi kuin melun suunnittelu- tai tunnusarvo. Tulosta ei voi käyttää suunnittelu- tai tunnusarvon ylittymisen todentamiseen.

**Menettely C: Tuulivoimalan tuulen nopeuden tavoitearvolla tuottaman melutason mittaaminen.**

Tuulivoimalan ja taustamelulähteiden yhdessä tuottama melutaso mitataan mittauspisteessä. Samanaikaisesti mitataan tuulen nopeus sekä tuulivoimalan lähellä, että melutason mittauspisteessä. Taustamelutaso mitataan samalla tavalla tuulivoimalan ollessa pysäytettynä. Kumpikin mitatuista melutasoista esitetään mittauspisteessä mitatun tuulen nopeuden funktiona. Taustamelutasot arvioidaan käyrällä regression avulla ja tuulivoimalan tuottama melutaso määritetään pisteittäin.

Tuulivoimalan lähellä mitatut tuulen nopeudet muutetaan tarvittaessa vastaamaan samaa korkeutta kuin tuulen nopeuden tavoitearvon määrittelyssä on käytetty (luku 5.3.4). Tuulivoimalan itse tuottamat korjatut melutasot piirretään tuulen nopeuden funktiona. Melutasopisteet approksimoidaan suoralla viivalla ja tuulen nopeuden tavoitearvolla vallitseva melutaso luetaan viivalta. Tuulen nopeuden tavoitearvona käytetään tuulen nopeutta 8 m/s (10 m:n referenssikorkeudella).

Menettelyllä saatua lukuarvoa voidaan käyttää verrattaessa tuulivoimalan tuottamaa melutasoa esimerkiksi suunnittelu- tai tunnusarvoon myös tilanteessa, jossa melutaso on määritetty suhteessa tuulivoimalan lähellä vallitsevaan tuulen nopeuteen.

## 5.2

### Mittauspisteet

Mittauspisteiden valinta tehdään mittausten tarkoituksen perusteella (melun suunnittelu- ja tunnusarvojen todentaminen, laskentatulokseen vertailuun, jne.). Mittauspaikan ympäristöolosuhteet mittausten aikana voivat vaikuttaa mittauspisteiden valintaan ja mittauksissa käytettävän mikrofonin sijoitukseen.

Mittaukset voidaan tehdä joko sijoittamalla mikrofoni telineeseen 1,5 m korkeudelle tai käyttämällä maahan sijoitettavaa mittauslevyä (kuva 2). Mikrofoni voidaan sijoittaa myös rakennuksen ulkoseinään asennetun levyn päälle. Levyn päälle asetettavaa mikrofonia käytettäessä mittaustuloksiin on tehtävä levyn vaikutuksen huomioon ottava korjaus, jonka suuruus on kaikissa tapauksissa – 6 dB. Telineeseen sijoitettua mikrofonia suositellaan käytettäväksi silloin, kun taustamelutaso on vähintään 3 dB tuulivoimalan tuottamaa melutasoa pienempi ja kun mikrofonin etäisyys ääntä heijastavista pystysuorista pinnoista on riittävän suuri. Taustamelutason selvittäminen edellyttää voimalan pysäyttämistä. Mikrofoni sijoitetaan siten, että sen ja mitattavan tuulivoimalan välissä on mahdollisimman vähän äänen etenemiseen vaikuttavia esteitä, kuten rakennuksia tai suurikokoisia puita. Mikrofonin sijoitus valitaan mahdollisuuksien mukaan myös siten, että aivan sen välittömässä läheisyydessä ei ole taustamelua aiheuttavaa kasvillisuutta.

Jos taustamelutaso on vähemmän kuin 3 dB tuulivoimalan tuottamaa melutasoa pienempi, maan pinnalle asetetun levyn käyttö mikrofonialustana on suositeltavaa (luku 4.3). Levyn käytöllä on mahdollista vähentää tuulen aiheuttamaa kohinaa mikrofonissa.

Mittauspisteiden valinnassa otetaan myös viite [2] huomioon.

## 5.3

### Tuulen nopeuden määrittäminen tuulivoimalan kohdalla

Mittausten aikana vallitsevan tuulen nopeuden määrittäminen tulisi ensisijaisesti perustua tuulivoimalan mitattuun sähkötehoon ja tehokäyrään. Jos tehokäyrää ei ole käytettävissä, tuulen nopeus voidaan määrittää napakorkeudelle tai vähintään 10 m korkeuteen sijoitetun anemometrin avulla.

#### 5.3.1

#### Tuulen nopeuden määrittäminen tuulivoimalan sähkötehon ja tehokäyrän avulla

Tuulen nopeus voidaan määrittää mittaamalla kunkin erillisen melutason mittauksen mittausaikaa vastaava tuulivoimalan tuottama sähköteho. Tätä varten tarvitaan valmistajan ilmoittama tuulivoimalan jäljitettävä tehokäyrä, josta selviää tuulivoimalan tuottama sähköteho eri tuulen nopeuksilla. Mitattavan tuulivoimalan asetusten tulee olla samat kuin tehokäyrän määrittämisessä käytetyllä tuulivoimalalla. Tehokäyrän tietojen tulee vastata lämpötilaa 15 °C ja ilmanpainetta 101,3 kPa. Mikäli mittaukset on tehty erilaisissa oloissa, näiden vaikutus tulee ottaa huomioon.

### 5.3.2

#### Tuulen nopeuden määrittäminen moottorikotelon päälle asennetun anemometrin avulla

Mittausten aikana vallitseva tuulen nopeus mitataan tuulivoimalan konehuoneen (nacelle) päälle asennetun anemometrin avulla.

### 5.3.3

#### Tuulen nopeuden määrittäminen 10 m korkeudelle sijoitetun anemometrin avulla

Mikäli tuulen nopeutta ei ole mahdollista mitata tuulivoimalan napakorkeudella, tuulen nopeus voidaan mitata vähintään 10 m korkeuteen sijoitetun anemometrin avulla. Anemometrin tulisi sijaita tuulen puolella tuulivoimalaan nähden.

### 5.3.4

#### Eri korkeuksilla mitattujen tuulen nopeuksien normalisointi

Eri korkeuksilla mitatut tuulen nopeudet tulee normalisoida samaa korkeutta vastaavaksi, jotta ne olisivat vertailukelpoisia. Vertailuarvona voidaan käyttää 10 metrin tai tuulivoimalan napakorkeutta. Korjaus tehdään olettamalla tuulen nopeusprofiili logaritmiseksi.

Napakorkeudella mitattu tuulen nopeus  $v_h$  voidaan muuntaa 10 m korkeuteen ( $v_{10}$ ) kaavalla

$$v_{10} = v_h \cdot \frac{\ln \frac{z_{ref}}{z_0}}{\ln \frac{h}{z_0}} \quad (5.3.1)$$

missä

$h$  on tuulivoimalan napakorkeus (m)

$z_0$  on maan karheus, taulukko 1

$z_{ref}$  on referenssikorkeus 10 m.

Taulukko 1. Erityyppisten maanpintojen karheus (rosoisuus).

| Maanpinnan tyyppi   | Karheus $z_0$ (m) |
|---|-------------------|
| Vesi, lumi, hiekka  | 0,0001            |
| Avoin tasainen maa, paljas maanpinta, leikattu nurmi                  | 0,01              |
| Viljelysmaa, jossa hieman kasvillisuutta                              | 0,05              |
| Asuinalue, pienet kaupungit, alueet, joilla on tiheää korkeaa puustoa | 0,3               |

#### 5.4

### Tuulen nopeuden ja suunnan mittaaminen mittauspisteen kohdalla

Tuulen nopeus mittauspisteen kohdalla mitataan edustavalla ja avoimella paikalla mikrofonin läheisyydessä ja vähintään 10 m korkeudella maan pinnasta.

Tuulen suunta määritetään samalla kohdalla kuin tuulen nopeus. Jos tuulen nopeus mitataan sekä tuulivoimalan, että mittauspisteen kohdalla on tuulen suunnan määrittäminen vain tuulivoimalan kohdalla riittävää.

Tuulen suunta lähimmästä tuulivoimalasta mittauspisteeseen (melulle altistuva alue) päin tulee olla  $\pm 45^\circ$ . Mittausten aikainen tuulen suunta valitaan siten, että mahdollisimman moni tuulivoima-alueen tuulivoimaloista on kulman  $\pm 45^\circ$  sisäpuolella.

Perustelluista syistä mittauksia voidaan tehdä myös muissa tuulen suunnissa. Lisämittaukset tehdään melulle altistuvissa kohteissa siinä tuulen suunnassa, jossa melun häiritsevyys on todettu merkittäväksi.

Tuulivoimaloiden melun häiritsevyyttä lisäävä pienitaajuinen merkityksellinen sykintä ("jyminä-tyyppinen" amplitudimodulaatio) esiintyy yleensä myötätuulen puolella tuulivoimalasta. "Suhina-tyyppinen" amplitudimodulaatio esiintyy yleensä voimakkaaimmin  $90^\circ$  myötätuulen suunnasta. Useiden tuulivoimaloiden synkroninen pyöriminen voi aiheuttaa merkityksellistä sykintää myös muissa suunnissa.

#### 5.5

### Mittausten aikana vallitsevat sääolot

Mittaukset tehdään seuraavissa sääoloissa verrattaessa mittaustuloksia mallinnettuihin melutasoihin:

- tuulen nopeus on sama kuin tuulen nopeuden tavoitearvo (mikäli tavoitearvo on käytössä);
- tuulen suunta on lähimmästä tuulivoimalasta ja mahdollisimman monesta muusta tuulivoima-alueen yksittäisestä tuulivoimalasta mittauspisteeseen (melulle altistuva alue) päin  $\pm 45^\circ$ . Tarvittaessa mittauksia tehdään myös muissa tuulen suunnissa;
- pystysuora lämpötilagradientti  $dT/dz$  on alueella  $-0,05^\circ\text{C}/\text{m} < dT/dz < 0,05^\circ\text{C}/\text{m}$ .

Lämpötilagradienttia koskeva vaatimus täyttyy yleensä, kun:

- mittaukset tehdään yöaikaan (aikana tunti auringonlaskun jälkeen ja tunti ennen auringonnousua);
- mittaukset tehdään päiväaikaan (aikana tunti auringonnousun jälkeen ja tunti ennen auringonlaskua), kun pilvisuus  $> 4/8$ . Pilvisuus on tällöin melko selkeästä puolipilviseen.

Suomessa vuodenaika ja maantieteellinen sijainti vaikuttavat merkittävästi auringon nousu- ja laskuaikoihin, mikä on otettava huomioon lämpötilagradienttia koskevan vaatimuksen täyttymisessä.

Muissa kuin vertailutapauksissa melutason mittaaminen tehdään niissä sääolosuhteissa, joissa melun aiheuttama häiriö on havaittavissa melulle altistuvassa kohteessa.

## 5.6

### Mittausten suorittaminen

Mittaukset voidaan tehdä kolmella tavalla (luku 5.1). Kussakin tavassa samanaikaisesti mitatut melutason ja tuulen nopeuden mittaussignaalit tallennetaan, jolloin tulosten tarkempi analysointi mittausten jälkeen on mahdollista.

#### 5.6.1

##### Menettely A

Tuulivoimalan toimiessa keskiäänitaso  $L_{AeqT}$  ja tuulen nopeus mitataan samanaikaisesti mitauspisteen kohdalla ja näiden keskiarvot määritetään samalle ajalle. Kunkin erillisen mittauksen suositeltava mittausaika  $T$  on 1 minuutti. Erillisiä mittauksia tulee olla vähintään 10 ja kokonaismittausajan tulee olla vähintään 30 minuuttia.

Taustamelutaso mitataan tuulivoimalan ollessa pysäytettynä ennen tuulivoimalan melutason mittaamista tai heti melutason mittaamisen jälkeen. Taustamelun mittauksien aikana mitataan samanaikaisesti myös tuulen nopeus mittauspaikalla vastaavalla tavalla kuin tuulivoimalan melutasoa mitattaessa.

Mikäli tuulen nopeudelle on asetettu tavoitearvo, vähintään kolme mittaustulosta tulee olla lukuarvon yläpuolella ja kolme alapuolella siten että suurin poikkeama tavoitearvosta on  $\pm 2$  m/s.

#### 5.6.2

##### Menettely B

Tuulivoimalan toimiessa keskiäänitaso  $L_{AeqT}$  ja tuulen nopeus mitataan samanaikaisesti mitauspisteen kohdalla ja näiden keskiarvot määritetään samalle ajalle. Kunkin erillisen mittauksen suositeltava mittausaika  $T$  on 1 minuutti. Erillisiä mittauksia tulee olla vähintään 10, joista vähintään kolme mittaustulosta tulee olla tuulen tavoitearvon yläpuolella ja kolme sen alapuolella siten että suurin poikkeama tavoitearvosta on  $\pm 2$  m/s.

Kokonaismittausajan tulee olla vähintään 30 minuuttia ja vähintään 10 minuuttia siitä tavoitearvon ala- ja yläpuolella.

#### 5.6.3

##### Menettely C

Tuulivoimalan toimiessa keskiäänitaso  $L_{AeqT}$  mitataan mitauspisteen kohdalla ja samanaikaisesti mitataan tuulen nopeudet tuulivoimalan ja mitauspisteen kohdalla ja näiden keskiarvot määritetään samalle ajalle. Kunkin erillisen mittauksen suositeltava mittausaika  $T$  on 1 minuutti. Erillisiä mittauksia tulee olla vähintään 10, joista vähintään kolme mittaustulosta

tulee olla tuulen tavoitearvon yläpuolella ja kolme sen alapuolella siten että suurin poikkeama tavoitearvosta on  $\pm 2$  m/s.

Kokonaismittausajan tulee olla vähintään 30 minuuttia ja vähintään 10 minuuttia siitä tavoitearvon ala- ja yläpuolella.

Kun tuulivoimala on pysäytettynä, taustamelutaso  $L_{AeqT}$  mitataan ennen tuulivoimalan melutason mittaamista tai heti melutason mittaamisen jälkeen. Taustamelun mittauksien aikana mitataan samanaikaisesti myös tuulen nopeus mittauspaiikalla vastaavalla tavalla kuin tuulivoimalan melutasoa mitattaessa.

## 5.7

### Taustamelukorjaus

Taustamelu mitataan tuulivoimalan ollessa pysäytettynä käyttämällä samoja mittausaikoja, mitattavien spektrien määriä ja samoja tuulen nopeusalueita kuin tuulivoimalan käynnissä ollessa tehtävissä mittauksissa.

Mitatun taustamelun energiakeskiarvot määritetään tuulen eri nopeuksilla ja näitä arvoja käytetään korjaamaan tuulivoimalan mitattuja äänenpainetasoja  $L_{Aeq,free}$  kaavan 5.6.1 mukaisesti.

$$L_{Aeq,corr} = 10 \cdot \lg \left( 10^{\frac{L_{Aeq,free}}{10}} - 10^{\frac{L_n}{10}} \right) \quad (5.6.1)$$

missä

|                |  |
|----------------|--|
| $L_{Aeq,corr}$ | on tuulivoimalan tuottama melutaso (korjattu arvo)                         |
| $L_{Aeq,free}$ | on tuulivoimalan ja taustamelun yhdessä aiheuttama melutaso (mitattu arvo) |
| $L_n$          | on keskimääräinen taustamelutaso kullakin tuulen nopeusalueella.           |

Kun  $L_{Aeq,free} - L_n$  on välillä 3–6 dB, korjattuihin arvoihin tehdään tästä kertova merkintä. Jos  $L_{Aeq,free} - L_n$  on 3 dB tai tämän alle, arvoa  $L_{Aeq,free}$  -3 dB voidaan pitää tuulivoimalan tuottaman melutason ylärajana.

## 5.8

### Mittaukset korkean taustamelutason vallitessa

Etäällä tuulivoimalasta tehtävissä melusomittauksissa taustamelun vaikutus mittaustulokseen voi olla merkittävä. Joissakin tapauksissa edellytetään erityistoimenpiteitä, jotta taustamelun vaikutus saataisiin poistettua mittaustuloksesta. Seuraavassa on esitetty menettelytapoja taustamelun vaikutuksen pienentämiseksi.

#### 5.8.1

### Mittauksen ajankohdan siirtäminen

Taustamelu voi vaihdella eri vuorokaudenaikoina. Taustamelu on yleensä pienempi yöaikaan. Tilanteissa, joissa taustamelu on päiväaikaan liian suuri, voidaan mittaukset tehdä yöllä.

#### 5.8.2

### Mikrofonin sijainnin muuttaminen

Mikäli mikrofonin lähellä havaitaan syntyvän liian paljon taustamelua (esimerkiksi tuulen kasvillisuudessa aiheuttama), voidaan mikrofonin sijaintia muuttaa edellyttäen, että uuden sijoituspaikan ominaisuudet vastaavat alkuperäisen mittauspisteen ominaisuuksia. Jos mikrofonin sijaintipaikkaa muutetaan, voi olla tarpeellista muuttaa myös tuulen nopeuden mittausta paikkaa.

#### 5.8.3

### Kaksiosaisen tuulisuojan käyttäminen

Tilanteissa, joissa tuulen aiheuttama kohina mikrofonissa muodostaa pääasiallisimman taustamelun, sekundaarisen tuulisuojan käyttö voi olla tarpeen (luku 4.2). Tuulisuoja voi vaikuttaa mitattavan äänen taajuusvasteeseen. Tuulisuojan mahdollisesti aiheuttama vaimennus on otettava huomioon mittaustulokseen tehtävällä korjauksella.

#### 5.8.4

### Mittauslevyn käyttäminen

Mittauslevy (sekä maan pinnalle että seinälle asetettava) käyttämällä saadut tulokset korjataan vapaan kentän arvoiksi kaavalla

$$L_{free} = L_{board} - 6dB \quad (5.7.1)$$

missä

$L_{free}$  on korjattu keskiäänitaso  $L_{Aeq,T}$

$L_{board}$  on mittauslevyä käyttämällä mitattu keskiäänitaso  $L_{Aeq,T}$



#### 5.8.5

### Mittaukset pienemmän tuulen nopeuden vallitessa

Tuulivoimalan melutaso ja taustamelutaso riippuvat tuulen nopeudesta. Joissakin tapauksissa taustamelutaso pienenee tuulen nopeuden pienetessä enemmän kuin tuulivoimalan melutaso. Mittauksen signaali-kohinasuhdetta on mahdollista parantaa tekemällä mittaukset pienemmän tuulen nopeuden vallitessa. Koska äänen eteneminen tuulivoimalasta mittauspisteeseen riippuu tuulen nopeudesta, tuulen nopeuden ei tulisi poiketa tavoitearvosta enempää kuin 2 m/s.

Mittaukset pienemmän tuulen nopeuden vallitessa ovat mahdollisia käytettäessä mittaussmenettelyä C jos tuulen suunta pysyy samana ja tuulivoimalan teho tuulen nopeuden funktiona on tiedossa. Mittaustarkkuus huononee kuitenkin jonkin verran. Pienemmän tuulen nopeuden vallitessa mitatut tulokset on korjattava ottamalla huomioon tuulen nopeuden muutoksen vaikutus.

#### 5.8.6

### Mittaukset lähempänä tuulivoimalaa

Mittausetäisyyden pienentäminen parantaa yleensä signaali-kohinasuhdetta. Yksittäisen tuulivoimalan melutasoa mitattaessa mittausetäisyyttä voidaan pienentää 25 % edellyttäen, että

- etäisyys uuteen mittauspisteeseen ylittää arvon  $1,5 \cdot (H+D/2)$ , missä H on tuulivoimalan napakorkeus ja D on roottorin halkaisija;
- mittauspisteestä tuulivoimalan napaan vedetyn viivan ja maanpinnan välinen kulma pysyy samana  $\pm 5^\circ$  (myötätuulimittauksissa  $\pm 10^\circ$ );
- mikrofoni on samalla korkeudella maanpinnasta kuin alkuperäisessä mittauspisteessä;
- maaston tyyppi ja maanpinnan akustinen impedanssi on samanlainen kuin alkuperäisessä mittauspisteessä;
- uusi sijainti on samanlainen alkuperäisen paikan kanssa tuulivoimalan äänen mahdollisten varjostusten suhteen.

Lähempänä tuulivoimalaa tehtävissä mittauksissa saadut tulokset tulee korjata laskennallisesti ottamalla huomioon lyhyempi mittausetäisyys. Korjaus tehdään kaavalla

$$L_{Aeq,corr} = L_{Aeq,red} - 20 \lg \left( \frac{R_1}{R_2} \right) \text{ dB} \quad (5.7.2)$$

missä

$L_{Aeq,corr}$  on korjattu melutaso

$L_{Aeq,red}$  on lähempänä tuulivoimalaa mitattu (mittauslevyn ja taustamelun suhteen korjattu) melutaso

$R_1$  on tuulivoimalan navan ja alkuperäisen mittauspisteen välinen etäisyys

$R_2$  on tuulivoimalan navan ja uuden mittauspisteen välinen etäisyys.

## Pienitaajuisen melun mittaaminen

Suuret tuulivoimalat voivat tuottaa pienitaajuisia ääntä, jonka mittaaminen ulkotiloissa voi olla hankalaa tuulen mikrofonissa aiheuttaman pienitaajuisen kohinan takia.

Pienitaajuisen melutason mittaaminen tehdään vastaavalla tavalla kuin tuulivoimalan tuottaman suurempitaajuisen melutason mittaaminen. Mittauksessa on käytettävä erityisesti pienitaajuisen melun mittaukseen tarkoitettua sekundaarista tuulisuojaa, jonka aiheuttama vaimennus mitattavaan meluun on otettava huomioon. Tämän lisäksi mittauksessa käytettävän laitteiston taajuusvasteen tulee olla lineaarinen 4 Hz asti.

Mittaukset tehdään 1/3-oktaaveittain keskitaajuuksilla 20 Hz–200 Hz ilman A-painotusta (lineaarisella alueella).

Pienitaajuisen melun mittauksista on tarkoituksenmukaista tallentaa kaikki mittaussignaalit (samanaikaiset tuulen nopeus- ja äänitiedot) ja analysoida tulokset myöhemmin.

## Melun kapeakaistaisuuden määrittäminen

Kapeakaistamittaus tehdään arvioitaessa tuulivoimalan tuottaman melun kapeakaistaisuutta/tonaalisuutta melulle altistuvassa kohteessa. Mittaukseen voidaan käyttää kahta menetelmää. Menetelmässä 1 käytetään kapeakaistaista RMS-spektriä ja menetelmässä 2 tämän lisäksi yksittäisiä lyhytaikaisia spektrejä. Menetelmät antavat samat tulokset stationäärisille signaaleille. Kapeakaistaisuus määritetään ensisijaisesti tallennetuista mittaussignaaleista standardin IEC 61400–11 [11] mukaisesti.

Melun ollessa kapeakaistaista mittaustulokseen kohdistetaan sanktio. Tulokseen lisätään säädöksessä määritelty lukuarvo (esimerkiksi 5 dB) ennen sen vertaamista suunnittelu- tai tunnusarvoon.

### Mittauspisteet

Kapeakaistaiset spektrit mitataan samoissa mittauspisteissä kuin varsinaisissa mittauksissa (mikrofonin ja anemometrien sijainnit).

### Menetelmä I

Mittaukset tehdään käyttämällä äänitasomittarin lineaarista asetusta. Muut mahdolliset äänilähteet eivät saa vaikuttaa mittaustulokseen. Tuulivoimalan roottorien pyöriessä vakionopeudella mitataan 1–2 minuuttia kestävät äänenpaineen tehollisarvot. FFT-analysointia käytettäessä mittaukset tehdään Hanning-ikkunoinnilla.

Mittauksissa käytettävä taajuusresoluutio riippuu äänen taajuudesta taulukon 2 mukaisesti.

Taulukko 2. Taajuusresoluutio eri taajuusalueilla.

| Ääneksen taajuus (Hz) | Taajuusresoluutio (Hz) |
|-----------------------|------------------------|
| < 2000                | 2,0–5,0                |
| ≥ 2000                | 2,0–12,5               |

Tuulen nopeuden tavoitearvolla, sallitun vaihteluvälin ollessa  $\pm 1$  m/s, mitataan vähintään viisi RMS-spektriä. Lisämittauksia voidaan tehdä tuulen nopeuksilla, joilla äänesten arvioidaan olevan merkityksellisimpiä.

Tuulivoimalan roottorien nopeuden vaihdellessa mitataan vähintään 30 kapeakaistaista spektriä (mittausaika 10 s) tuulen nopeuden tavoitearvolla ja sallitun nopeuden vaihteluvälin ollessa  $\pm 1$  m/s.

Muiden äänilähteiden mahdollinen vaikutus mittaustulokseen on estettävä mittaolosuhteiden valinnalla tai niiden vaikutus on poistettava mittaustuloksista.

### 5.10.3

## Menetelmä 2

Luvun 5.9.2 mukaisten mittausten lisäksi mitataan lyhytaikaisia hetkellisiä spektrejä käyttämällä aikapainotusta F. Kustakin 1–2 minuuttia kestävästä jaksosta määritetään vähintään 50 lyhytaikaista spektriä.

### 5.11

## Melun impulssimaisuuden määrittäminen

Melun impulssimaisuus ja merkittävyys määritetään Nordtest menetelmän NT ACOU 112 mukaisesti [13]. Melu on impulssimaista, jos arvioitu korjaus  $K_f$  on suurempi kuin 3 dB. Melun impulssimaisuus määritetään tallennetuista ja edustavista ääninäytteistä.

Melun ollessa impulssimaista mittaustulokseen kohdistetaan sanktio. Tulokseen lisätään säädöksessä määritelty lukuarvo (esimerkiksi 5 dB) ennen sen vertaamista suunnittelu- tai tunnusarvoon.

### 5.12

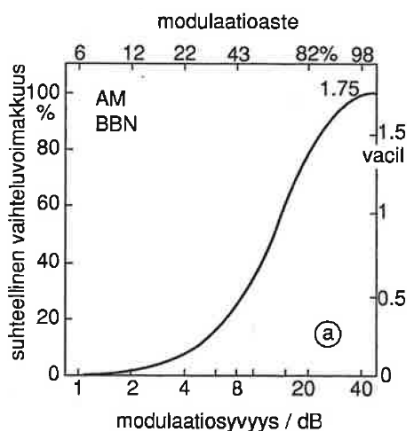
## Melun merkityksellisen sykinän (amplitudimodulaatio) määrittäminen

Melun merkityksellinen sykintä (amplitudimodulaatio) ja sen aste määritetään mittausten aikana tallennetuista signaaleista.

Tuulivoimalan amplitudimodulaation määrittämiseen ei tällä hetkellä ole käytettävissä standardoitua menetelmää tai vertailuarvoa merkityksellisen sykinän (excess amplitude modulation) todentamiseksi.

Tuulivoimalan tai tuulivoima-alueen tuulivoimaloiden tuottaman melutason merkityksellisen sykkinnän aste voidaan kuitenkin määrittää viitteen [14] mukaisella menettelyllä (Modulaatioiden ja alukkeiden havaitseminen).

Tuulivoimalan melulle altistuvassa kohteessa tuottaman melutason merkityksellisen sykkinnän asteen ja sen häiritsevyyden välillä ei ole tiedeyhteisön yleisesti hyväksymää arviointiasteikkoa. Amplitudimodulaatio on selvästi kuultavissa äänisignaaleissa, jos äänisignaalin modulaatioaste on yli 20 % (modulaatiosyvyys on tällöin yli 3 dB) vaihtelutaajuuden ollessa välillä 0,5 - 30 Hz. Kuultavuus edellyttää, että äänisignaalin kokonaistaso on riittävän korkea.



Kuva 3. Modulaatioaste [14].

Varovaisuusperiaate huomioden voidaan arvioida, että tuulivoimalan tuottaman äänen modulaatiosyvyyden ollessa yli 3 dB ja modulaation vaihtelutaajuuden ollessa 0,5–30 Hz, melu on luonteeltaan merkityksellisesti sykkivää (amplitudimoduloitunutta) ja sanktio on tarkoituksenmukaista huomioda mittaustuloksessa.

Melun ollessa merkityksellisesti sykkivää mittaustulokseen kohdistetaan sanktio. Tulokseen lisätään säädöksessä määriteltä lukuarvo (esimerkiksi 5 dB) ennen sen vertaamista suunniteltu- tai tunnusarvoon

## Mittaukset sisätiloissa

Sisätiloissa tehtävissä melumittauksissa noudatetaan viitteiden [2] ja [12] ohjeita. Pienitaajuisen melun mittaamisessa sisätiloissa noudatetaan lisäksi seuraavassa annettuja lisäohjeita.

Pienitaajuinen melu mitataan kolmessa 1,5 m korkeudella lattian pinnasta sijaitsevassa pisteessä. Kaksi niistä sijaitsee oleskelualueella, joissa pienitaajuisen melun arvioidaan olevan voimakkaimmillaan ja yksi huoneen nurkassa (0,5 m–1 m etäisyydellä seinistä). Mittaukset tehdään taajuusalueella 20–200 Hz ja raportoitava tulos on kolmen mittauspisteen tulosten energiakeskiarvo.

Melun suunnittelu- ja tunnusarvojen todentaminen suoritetaan viitteiden [2] ja [12] perusteella. Lisäohjeita on mahdollista hyödyntää arvioitaessa pienitaajuisen melun mitoitukseen liittyviä kysymyksiä.

## 6 Mittausten raportointi

Mittaukseen liittyvät tiedot kuvataan mahdollisimman tarkasti. Kaikki mittaussignaalit tallennetaan mittausten aikana. Seuraavat tiedot raportoidaan:

|  |                        |                        |                        |                                |                        |                        |                        |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| RAPORTIN JA RAPORTOIJAN TIEDOT * tarkentavat tiedot voi esittää kartalla tai muissa liitteissä |                        |                        |                        |                                |                        |                        |                        |
| Mittausraportin numero/tunniste:   |                        |                        |                        | Mittausajankohta:<br>klo:      |                        |                        |                        |
| Tekijä/organisaatio, yhteystiedot:   |                        |                        |                        | Raportin hyväksyntäpäivämäärä: |                        |                        |                        |
| VASTUUHENKILÖT   |                        |                        |                        |                                |                        |                        |                        |
| Mittaaja:  |                        |                        |                        | Tarkastaja/hyväksyjä:          |                        |                        |                        |
| MITTAUKSISSA KÄYTETYT LAITTEET   |                        |                        |                        |                                |                        |                        |                        |
| Valmistajan nimi:  |                        |                        |                        | Mittarin tyyppi:               |                        |                        |                        |
| Mittarin sarjanumero:  |                        |                        |                        |                                |                        |                        |                        |
| Laitteiston kalibrointipäivämäärä ja kalibroija*:  |                        |                        |                        |                                |                        |                        |                        |
| Mikrofonin sijoituslevyn tiedot (kuva*):   |                        |                        |                        |                                |                        |                        |                        |
| Sekundäärisen tuulisuojan tiedot*:   |                        |                        |                        |                                |                        |                        |                        |
| Tuulen nopeuden määrittelyn menettely ja laitteisto:   |                        |                        |                        |                                |                        |                        |                        |
| Anemometrien ja tuulensuunnan mittareiden sijoitukset*:  |                        |                        |                        |                                |                        |                        |                        |
| TUULIVOIMALAN TIEDOT*  |                        |                        |                        |                                |                        |                        |                        |
| Tuulivoimalan valmistaja:  |                        |                        |                        | Tyyppi:                        |                        | Sarjanumero/t:         |                        |
| Nimellisteho:  |                        | Napakorkeus:           |                        | Roottorin halkaisija:          |                        | Tornin tyyppi:         |                        |
| Maastotiedot mittauspisteen ja voimalan ympäristössä*:   |                        |                        |                        |                                |                        |                        |                        |
| TUULIVOIMALAN SIJAINTI X,Y (koordinaatisto)*:  |                        |                        |                        |                                |                        |                        |                        |
| Voimala 1:<br>X:<br>Y:   | Voimala 2:<br>X:<br>Y: | Voimala 3:<br>X:<br>Y: | Voimala 4:<br>X:<br>Y: | Voimala 5:<br>X:<br>Y:         | Voimala 6:<br>X:<br>Y: | Voimala 7:<br>X:<br>Y: | Voimala 8:<br>X:<br>Y: |

|   |            |                |            |            |            |            |            |
|---|------------|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| MAANPINNAN TYYPPI:  |            |                |            |            |            |            |            |
| Voimala 1:  | Voimala 2: | Voimala 3:     | Voimala 4: | Voimala 5: | Voimala 6: | Voimala 7: | Voimala 8: |
| MAHDOLLISUUS VAIKUTTAA TUULIVOIMALAN MELUPÄÄSTÖÖN KÄYTÖN AIKANA JA VAIKUTUS MELUUN: |            |                |            |            |            |            |            |
| Lapakulman säätö  |            | Pyörimisnopeus |            | Muu, mikä  |            |            |            |
| Kyllä   | dB         | Kyllä          | dB         |            |            |            | dB         |
| Ei  |            | Ei             |            |            |            |            | dB         |

|  |                               |   |  |
|--|-------------------------------|---|--|
| MITTAUSPAIKAN SIJAINTI*                                    |                               |   |  |
| MITTAUSPISTEEN SIJAINTI X,Y (koordinaatisto)*:             |                               |   |  |
| Mittauspiste 1:  | Mittauspiste 2:               | Mittauspiste 3:                         | Mittauspiste 4:                                      |
| Mikrofonin korkeus:  | Mikrofonin korkeus:           | Mikrofonin korkeus:                     | Mikrofonin korkeus:                                  |
| MAANPINNAN TYYPPI:   |                               |   |  |
| Maanpinnan tyyppi  | Karheus<br>z <sub>0</sub> [m] | Arvioitu prosenttiosuus<br>alueella [%] | Maanpinnan karheus tuulennopeuden<br>mittauspaikalla |
| Vesi, lumi, hiekka   | 0,0001                        | MP 1:<br>MP 2:                          |  |
| Avoin tasainen maa,<br>paljas maanpinta, leikattu<br>nurmi | 0,01                          | MP 1:<br>MP 2:                          |  |
| Viljelysmaa, jossa hieman<br>kasvillisuutta                | 0,05                          | MP 1:<br>MP 2:                          |  |
| Asuinalue, alueet, joilla on<br>tiheää korkeaa puustoa     | 0,3                           | MP 1:<br>MP 2:                          |  |
| TAUSTAMELU MELULÄHDETYYPIT JA SIJAINTI*:                   |                               |   |  |
| Mittauspiste 1:  | Mittauspiste 2:               | Mittauspiste 3:                         | Mittauspiste 4:                                      |
| MERKITTÄVIEN HEIJASTAVIEN PINTOJEN SIJAINTI*:              |                               |   |  |
| Mittauspiste 1:  | Mittauspiste 2:               | Mittauspiste 3:                         | Mittauspiste 4:                                      |
| SÄÄTIEDOT*   |                               |   |  |
| Suhteellinen kosteus:                                      |                               | Lämpötila:                              |  |
| Ilmanpaine:  |                               | Pilviaste x/8:                          |  |
| Turbulenssi:   |                               | Auringon korkeus:                       |  |
| Tuulen nopeus ja suunta:                                   |                               | Normalisoitu tuulen nopeus:             |  |
| 10 m:  | m:                            | m:                                      | m:   |
|  | m:                            | m:                                      | m:   |

|   |    |                 |    |  |    |                 |    |
|---|----|-----------------|----|--|----|-----------------|----|
| <b>MITTAUS JA MITTAUSTULOKSET</b>   |    |                 |    |  |    |                 |    |
| Mittaus- ja näytteenottomenetelmä:  |    |                 |    |  |    |                 |    |
| Mittauslaitteen kalibrointitulokset ennen mittauksia:   |    |                 |    |  |    |                 |    |
| Mittauspiste 1:   |    | Mittauspiste 2: |    | Mittauspiste 3:                                |    | Mittauspiste 4: |    |
| Mittauslaitteen kalibrointitulokset mittauksen jälkeen:   |    |                 |    |  |    |                 |    |
| Mittauspiste 1:   |    | Mittauspiste 2: |    | Mittauspiste 3:                                |    | Mittauspiste 4: |    |
| Melun erityispiirteiden mittaus ja havainnot:   |    |                 |    |  |    |                 |    |
| Kapeakaistaisuus / Tonaalisuus  |    | Impulssimaisuus |    | Merkityksellinen sykintä (amplitudimodulaatio) |    | Muu, Mikä:      |    |
| kyllä   | ei | kyllä           | ei | kyllä  | ei | kyllä           | ei |
| Taustamelun voimakkuus ja sen vaikutus tulokseen:   |    |                 |    |  |    |                 |    |
| Mittauspiste 1:   |    | Mittauspiste 2: |    | Mittauspiste 3:                                |    | Mittauspiste 4: |    |
| <b>TUULIVOIMALOIDEN MELUN MITTAAMINEN ALTISTUVASSA KOHTEESSA</b>  |    |                 |    |  |    |                 |    |
| <b>MENETTELY A:</b>   |    |                 |    |  |    |                 |    |
| Tuulivoimalan melutason mittaaminen   |    |                 |    |  |    |                 |    |
| Tuulivoimalan aiheuttama korjattu melutaso $L_{Aeq,corr}$ :   |    |                 |    |  |    |                 |    |
| Mittauspiste 1:   |    | Mittauspiste 2: |    | Mittauspiste 3:                                |    | Mittauspiste 4: |    |
| <b>MENETTELY B:</b>   |    |                 |    |  |    |                 |    |
| Tuulivoimalan ja taustamelun yhdessä tuottaman melutason mittaaminen tuulen nopeuden tavoitearvolla.                |    |                 |    |  |    |                 |    |
| Tuulivoimalan ja taustamelun kokonaismelutaso vapaan kentän arvo $L_{Aeq,free}$ :                                   |    |                 |    |  |    |                 |    |
| Mittauspiste 1:   |    | Mittauspiste 2: |    | Mittauspiste 3:                                |    | Mittauspiste 4: |    |
| <b>MENETTELY C:</b>   |    |                 |    |  |    |                 |    |
| Tuulivoimalan tuulen nopeuden tavoitearvolla tuottaman melutason mittaaminen.                                       |    |                 |    |  |    |                 |    |
| Tuulivoiman korjattu melutaso $L_{Aeq,corr}$ tuulen nopeuden tavoitearvolla:  |    |                 |    |  |    |                 |    |
| Mittauspiste 1:   |    | Mittauspiste 2: |    | Mittauspiste 3:                                |    | Mittauspiste 4: |    |
| Tuulivoiman korjattu melutaso $L_{Aeq,corr}$ tuulen nopeuden funktiona 10 metrin tai tuulivoimalan napakorkeudella; |    |                 |    |  |    |                 |    |
| Mittauspiste 1:   |    | Mittauspiste 2: |    | Mittauspiste 3:                                |    | Mittauspiste 4: |    |
| Taustamelutaso mittauspisteessä mitatun tuulen nopeuden funktiona   |    |                 |    |  |    |                 |    |
| Mittauspiste 1:   |    | Mittauspiste 2: |    | Mittauspiste 3:                                |    | Mittauspiste 4: |    |

#### MUUT LIITTEET:

- 1) Tuulivoimalan tehokäyrä
- 2) Tuulivoima-alueen karttapohja, josta voi erottaa maaston muodot, maanpinnan tyyppin, tuulivoimaloiden ja mittauspisteiden sijainnin sekä altistuvien kohteiden sijainnin, sekä mahdollisten taustamelua aiheuttavien toimintojen sijainnit
- 3) Alueen kaavakartta
- 4) Kuvat mittauspaikasta, laitteistoista jne.
- 5) Melutason arviointi melupäästön avulla. Tulosten luotettavuus ja edustavuus.



| MITTAUSTULOKSET 1/3-OKTAAVEITTAIN |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Hz                                | MP 1 | MP 2 | MP 3 | MP 4 | MP 5 | MP 6 | MP 7 |
| 20                                |      |      |      |      |      |      |      |
| 25                                |      |      |      |      |      |      |      |
| 31,5                              |      |      |      |      |      |      |      |
| 40                                |      |      |      |      |      |      |      |
| 50                                |      |      |      |      |      |      |      |
| 63                                |      |      |      |      |      |      |      |
| 80                                |      |      |      |      |      |      |      |
| 100                               |      |      |      |      |      |      |      |
| 125                               |      |      |      |      |      |      |      |
| 160                               |      |      |      |      |      |      |      |
| 200                               |      |      |      |      |      |      |      |
| 250                               |      |      |      |      |      |      |      |
| 315                               |      |      |      |      |      |      |      |
| 400                               |      |      |      |      |      |      |      |
| 500                               |      |      |      |      |      |      |      |
| 630                               |      |      |      |      |      |      |      |
| 800                               |      |      |      |      |      |      |      |
| 1000                              |      |      |      |      |      |      |      |
| 1250                              |      |      |      |      |      |      |      |
| 1600                              |      |      |      |      |      |      |      |
| 2000                              |      |      |      |      |      |      |      |
| 2500                              |      |      |      |      |      |      |      |
| 3150                              |      |      |      |      |      |      |      |
| 4000                              |      |      |      |      |      |      |      |
| 5000                              |      |      |      |      |      |      |      |
| 6300                              |      |      |      |      |      |      |      |
| 8000                              |      |      |      |      |      |      |      |
| 10000                             |      |      |      |      |      |      |      |

| PIENITAAJUINEN MELU   |      |      |      |      |  |  |  |
|---|------|------|------|------|--|--|--|
| A-painotetut tai lineaariset melutasot altistuvien kohteiden (rakennusten) ulkopuolella |      |      |      |      |  |  |  |
| HZ  | MP 1 | MP 2 | MP 3 | MP 4 |  |  |  |
| 20  |      |      |      |      |  |  |  |
| 25  |      |      |      |      |  |  |  |
| 31,5  |      |      |      |      |  |  |  |
| 40  |      |      |      |      |  |  |  |
| 50  |      |      |      |      |  |  |  |
| 63  |      |      |      |      |  |  |  |
| 80  |      |      |      |      |  |  |  |
| 100   |      |      |      |      |  |  |  |
| 125   |      |      |      |      |  |  |  |
| 160   |      |      |      |      |  |  |  |
| 200   |      |      |      |      |  |  |  |

## VIITTEET

1. Tuulivoimamelun mittausmetodiikan kehittäminen. Tutkimusraportti VTT-R-04680-13.
2. Ympäristömelun mittaaminen Mätning av omgivningsbuller. Ympäristöministeriön ympäristön-suojeluosaston Ohje 1 1995. Direktiv 1 1995. 81 s.
3. Tuulivoimaloiden melupäästön todentaminen mittaamalla. Ympäristöhallinnon ohjeita 3/2014.
4. IEA Recommended Practices for Wind Turbine Testing and Evaluation. 10. Measurement of Noise Immission from Wind Turbines at Noise Receptor Locations, first ed., 1997.
5. Mätning av bullerimmission från vindkraftverk. Elforsk rapport 98:24. October 1998.
6. Compliance Protocol for Wind Turbine Noise. Guideline for Acoustic Assessment and Measurement. Ontario Ministry of the Environment.
7. Measurement of Audible Noise from Wind Turbines - Phase 1 Report - Literature and Jurisdictional Review. Ontario Ministry of the Environment. 11 June 2010.
8. IEC 60942. Electroacoustics - Sound calibrators. 177 s.
9. IEC 61260. Electroacoustics - Octave-band and fractional-octave band filters.
10. IEC 61672-1:2002. Electroacoustics - Sound Level meters - Part 1: Specifications. 85 s.
11. IEC 61400-11. Wind turbines – Part 11: Acoustic noise measurement techniques. Edition 3.0 2012-11. International Electrotechnical Commission.
12. Sosiaali- ja terveysministeriö. Helsinki 2003. Asumisterveysohje. Sosiaali- ja terveysministeriön oppaita 2003:1. 93 s.
13. NT ACOU 211. Acoustics: Prominence of impulsive sounds and for adjustment of  $L_{Aeq}$ . Approved 2002-05. Nordtest.
14. Karjalainen, M. Kommunikaatioakustiikka. Espoo 2009. Aalto-yliopisto, Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos. 255 s.



## FÖRORD

Miljöministeriet ger följande anvisning för mätning av bullernivån från vindkraftverk vid objekt som utsätts. Anvisningen ges med stöd av 108 § och 117 § i miljöskyddslagen (86/2000). Anvisningen träder i kraft den 28 februari 2014 och gäller tills vidare.

Buller är enligt 3 § i miljöskyddslagen (86/2000) utsläpp som orsakar förorening av miljön. Enligt lagens 5 § ska verksamhetsutövaren tillräckligt väl känna till verksamhetens konsekvenser och risker för miljön samt möjligheterna att minska verksamhetens negativa miljöpåverkan (*skyldighet att vara konsekvensmedveten*). Enligt lagens 25 § ska kommunen inom sitt område i nödvändig omfattning följa miljöns tillstånd, på det sätt som de lokala förhållandena kräver.

Enligt 5 § i markanvändnings- och bygglagen (132/1999) är syftet med områdesplaneringen att främja bland annat skapandet av en trygg, hälsosam och trivsamt livsmiljö och omgivning. I områdesanvändningen måste man enligt kraven på planernas innehåll motverka olägenheter orsakade av buller, skakning och luftföroreningar samt sträva efter att minska de olägenheter som redan förekommer.

Anvisningen för mätning av buller från vindkraftverk är avsedd som anvisning när man bedömer den bullerbelastning som alstras av vindkraftverk i verkställandet och tillämpningen av miljöskyddslagen samt i förfaranden enligt markanvändnings- och bygglagen.

Överdirektör  
Helena Säteri

Miljöråd  
Ari Saarinen



# 1 Inledning

I den här anvisningen ges metoder för att mäta och bedöma bullernivån från ett vindkraftverk eller från flera vindkraftverk i ett vindkraftsområde vid ett objekt som utsätts.

Mätningen av bullret från vindkraftverk avviker från mätningen av annat omgivningsbuller[2]. På grund av hård vind eller kraftigt bakgrundsbuller är det inte nödvändigtvis möjligt att mäta bullernivån på avstånd från vindkraftverket (immissionsmätningar). Ljudet från vindkraftverken kan innehålla lågfrekventa komponenter och det kan vara impulsartat, smalbandigt eller signifikant pulserande (amplitudmodulering). Det ljud och den ljudstyrka som vindkraftverken alstrar varierar betydligt temporalt. Ett kraftverk arbetar endast under en del av drifttiden vid sin nominella effekt, då bullerutsläppet (emissionen) är som störst.

I anvisningen finns uppgifter om mätmetoder, den apparatur som ska användas och hur resultaten ska presenteras. Mätningar kan göras i alla riktningar kring ett vindkraftverk (eller en grupp vindkraftverk).

Bullernivån (bullerimmissionen) bestäms som A-vägd ljudtrycksnivå (ljudnivå) och vid behov också per frekvensband. För att förbättra mätresultatens repeterbarhet och vid en jämförelse mellan resultaten och modelleringsresultaten är det nödvändigt att mätningarna utförs under vissa specifika ljudfortplantningsförhållanden (väderförhållanden).

Den lågfrekventa bullernivån inomhus kan bedömas inte bara genom mätning utan även kalkylmässigt på basis av det granskade vindkraftverkets bullerutsläpp, ljudets fortplantning från vindkraftverket till utsidan av den granskade byggnadens mantel samt ljudisoleringen i byggnadens mantel, förutsatt att tillräcklig bakgrundsinformation finns tillgänglig. Bedömningen av ljudisoleringen i byggnadens mantel kan grunda sig på mätresultat, kalkyler eller en jämförelse med en känd byggnads eller byggnadsdels förmåga att isolera luftburet ljud.

Mätning och analys av bullernivån från vindkraftverk kräver specialkunskap i akustik och erfarenhet av mätning av omgivningsbuller för att resultaten ska vara tillförlitliga, spårbara och jämförbara.

## 2 Tillämpningsområde

Mätninganvisningen kan användas för att fylla i de planerade och karaktäristiska värdena (rikt- och gränsvärdena) samt för att jämföra resultaten av bullermodelleringen med begränsningarna i anvisningen. Då utförs mätningarna under de väderförhållanden som fastställs i anvisningen.

Genom metoder enligt anvisningarna är det dessutom möjligt att utreda bullrets eventuella smalbandighet, impulsart och signifikanta pulserande (amplitudmodulering). Anvisningen kan också utnyttjas som sådan eller tillsammans med övriga ljudtekniska myndighetsanvisningar i situationer där buller från vindkraftverk orsakar störningar i miljön eller inne i byggnader. Mätningarna utförs då i väderförhållanden under vilka störningen som bullret orsakar kan observeras.

Tillvägagångssätten som presenteras i anvisningen tillämpas i situationer där det är möjligt att utföra tillförlitliga ljudnivåmätningar i förhållanden som är gynnsamma med tanke på bullerfortplantningen vid det objekt som utsätts för bullret.

Kraftigt bakgrundsbuller kan minska mätningens signal/brusförhållande, vilket försämrar mätresultatets tillförlitlighet. Bullernivån från vindkraftverk kan i sådana fall fastställas genom att mäta vindkraftverkets bullerutsläpp (ljudeffekt) enligt en anvisning upprättad specifikt för detta ändamål och räkna ut bullernivåerna vid granskningspunkterna på basis av det uppmätta bullerutsläppet och egenskaperna i den omgivande terrängen [3]. Eftersom metoden (verifieringen) motsvarar eller kan motsvara en bullermodellering (kalkylering), är det inte möjligt att, utan tillräcklig ljudteknisk undersökning, använda resultatet direkt för att verifiera att de planerade och karaktäristiska värdena (rikt- och gränsvärden) uppfylls. En tillräcklig ljudteknisk undersökning innebär att resultatets tillförlitlighet och representativitet bedöms och att resultatet rapporteras.



## 3 Definitioner

### Ljudtryck $p$ [Pa]

Skillnaden mellan ett ljuds momentana tryck och det statiska lufttrycket, i allmänhet som effektivvärde.

### A-vägt ljudtryck $p_A$ [Pa]

Ljudtrycket definierat med användning av A-frekvensvägning, i allmänhet som effektivvärde.

### Ljudtrycksnivå $L_p$ [dB]

Den tiodubbla tiologaritmen av kvadraten på förhållandet mellan ljudtryckets effektivvärde och referensljudtrycket.

### Ljudnivå $L_{pA}$ [dB]

Den tiodubbla logaritmen av kvadraten på förhållandet mellan effektivvärdet för det momentana A-vägsda ljudtrycket och referensljudtrycket.

### Medelljudnivå (ekvivalentljudnivå, ekvivalentnivå) $L_{Aeq}$ [dB]

Den ljudnivå ( $L_{Aeq,T}$ ) som motsvarar det A-vägsda ljudtryckets genomsnittliga effektivvärde under en definierad tidsperiod ( $T$ ). Medelljudnivån bestäms med ekvationen

$$L_{Aeq,T} = 10 \lg \left( \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} 10^{\frac{L_{pA}(t)}{10}} dt \right) = 10 \lg \left( \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right),$$

där

$t_1$  är startpunkten för den definierade tidsperioden  $T$

$t_2$  är slutpunkten för den definierade tidsperioden  $T$

$L_{pA}(t)$  är momentanvärdet [dB] för det undersökta ljudets ljudnivå

$p_A(t)$  är momentanvärdet [Pa] för det undersökta ljudets A-vägsda ljudtryck.

$p_0$  är referensljudtrycket 20  $\mu$ Pa.

**Bullernivå (bullerimmission)  $L_{pA}$  [dB]**

Ljudnivån i det objekt som är utsatt för buller.

**Lågfrekvent buller**

Med lågfrekvent buller avses här buller i frekvensområdet 20–200 hertz [Hz]. Ljud med frekvenser lägre än 20 Hz kallas infraljud.

**Bakgrundsbuller**

Annat än det (mätbara) buller som alstras av vindkraftverk

**Signal/brusförhållande**

Förhållandet signal/brus används för att beskriva hur en önskad signal (t.ex. ljudet från ett vindkraftverk) urskiljs från bakgrundsbruset (t.ex. suset som orsakas av strömning i vegetationen). Ju bättre signal/brusförhållande desto mindre störs mätningen av brus.

**Planerade och karaktäristiska värden**

Med de planerade och karaktäristiska värdena för buller avses här de gräns- eller riktvärden för buller som baserar sig på lagstiftning, miljötillstånd eller myndighetsanvisningar.

**Bullerutsläpp (bulleremission)**

Ljudeffektnivån hos ett vindkraftverk eller likadana vindkraftverk i ett vindkraftsområde.

**Bullrets särdrag**

Särdragen hos buller är de egenskaper som har att göra med ljudets tids- och frekvensbeteende och som ökar bullrets störande verkan i ett område som utsätts för buller. Särdragen är bland annat smalbandighet, tonalitet, impulsart och signifikant pulserande.

**Bullrets smalbandighet och tonalitet**

Med tonalitet avses här att ljudtrycksnivån hos en eller flera rena toner urskiljs från nivån hos ett maskerande ljud på ett kritiskt band kring den rena tonen (tonerna).

Bullret är smalbandigt eller tonalt om där finns rena toner som ökar bullerolägenheten, och som man kan urskilja genom hörselintryck, eller smalbandiga komponenter i ett område som utsätts för buller. Smalbandigheten konstateras genom metoden i hänvisning [11].

**Ren ton**

En ton som innehåller en enkel frekvens En ton vars ljudtryck varierar sinusformat som en funktion av tiden.

**Frekvensband, frekvensintervall**

Förhållandet eller skillnaden mellan två frekvenser.

### **Bullrets impulsart**

Bullret är impulsartat om där finns kortvariga (transienta) toner som ökar bullerolägenheten, och som man kan urskilja genom hörselintryck, i ett område som utsätts för buller. Impulsarten konstateras genom metoden i hänvisning [13].

### **Bullrets signifikanta pulserande, amplitudmodulering (excess amplitude modulation)**

Bullret är signifikant pulserande, eller amplitudmodifierat, om där finns periodiska fluktuationer i ljudstyrkan som man kan urskilja genom hörselintryck och som ökar bullerolägenheten i ett område som utsätts för buller. Det signifikanta pulserandet konstateras genom metoden i hänvisning [14].

### **Sanktion**

Med sanktion avses en åtgärd där man på grund av bullrets impulsart, smalbandighet eller signifikanta pulserande (tidsmässig fluktuation i ljudstyrkan, amplitudmodulation) i mätresultatet lägger till ett siffervärde som ges i författningen (t.ex. 5 dB) innan man jämför det med det planerade eller det karaktäristiska värdet.

### **Målvärde för vindhastigheten**

Den vindhastighet vid vilken man vill mäta ljudtrycksnivån. Målvärdet för vindhastigheten motsvarar i mätningarna den rådande vindhastighet på vindkraftverkets navhöjd som alstrar maximalt bullerutsläpp vid kraftverkets nominella effekt.

## 4 Mätapparatur

### 4.1

#### Ljudtekniska apparater

Den ljudtekniska mätapparaturen (medräknat eventuella alternativa apparater och hjälpanordningar, exempelvis registreringsapparater) ska uppfylla kraven för ljudnivåmätare i noggrannhetsklass 1 i standarden IEC 61672-1 [10]. Apparatur som används för mätningar per oktav- eller tersband ska uppfylla kraven i standarden IEC 61260 [9]

Diametern i den mikrofon som används i mätningarna får vara högst 13 mm.

Mätanordningarnas funktion ska granskas och nödvändiga justeringar ska göras med hjälp av en extern kalibreringsljudkälla. Kalibreringsljudkällan ska uppfylla kraven i standarden IEC 60942 [8] Kalibreringen ska göras före och efter varje mätserie. Differensen mellan de kalibreringsresultat som gjorts före respektive efter mätningarna får inte överskrida 0,2 dB. Ifall skillnaden i kalibreringsvärde före respektive efter en mätning är större än 0,2 dB måste nya mätningarna göras. I kalibreringen ska hela kedjan av mät- och registreringsapparater kalibreras. Exempelvis måste man beakta inverkan av mikrofonens förlängningskabel. Kalibreringen ska göras enligt tillverkarens anvisningar. Kalibratoren ska kontrolleras med minst två års intervaller och resultaten ska vara spårbara.

Ifall utskrivningsapparaturen ingår i en kedja som påverkar mätresultaten ska också den kalibreras.

De apparater som används i mätningarna och i analysen av mätningarna, också oktav- och tersfiltren, ska beskrivas i mätrapporten. Beskrivningen ska omfatta bland annat apparattyper och kalibreringar samt en utredning gällande provtagningsmetoden (kap. 6). Apparaterna ska användas enligt tillverkarens anvisningar.

#### 4.2

### Vindskydd

Beroende på mätningens syfte och mätplatsens egenskaper kan mikrofonen placeras i ett mikrofonstativ eller på en mätskiva på marken.

Som vindskydd för en mikrofon som placeras i ett stativ används det primära vindskydd som rekommenderas av apparatens tillverkare. Vid behov används ytterligare ett vindskydd som placeras runt det primära vindskyddet.

Kring en mikrofon som finns på en mätskiva placeras ett vindskydd (vindskydd 1) enligt bild 1 och vid behov ytterligare ett vindskydd (vindskydd 2).

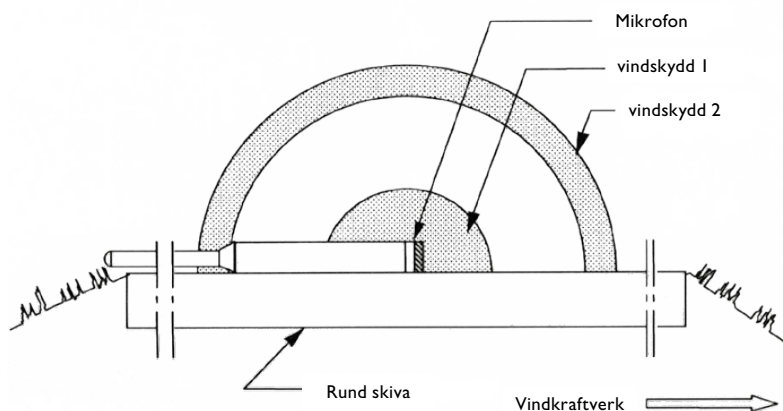


Bild 1. En rund skiva, på vilken en mikrofon med vindskydd placerats [11].

Vindskyddets inverkan på mikrofonens frekvensrespons ska presenteras i mätningsrapporten.

#### 4.3

### Mätskiva

För att minska det brus som orsakas av vinden kan mikrofonen placeras på markytan på en skiva tillverkad av ett akustiskt hårt material enligt bild 2. Skivan ska i första hand vara cirkelformad och diametern ska vara åtminstone 1,0 m. Mikrofonen placeras så nära skivans yta som möjligt.

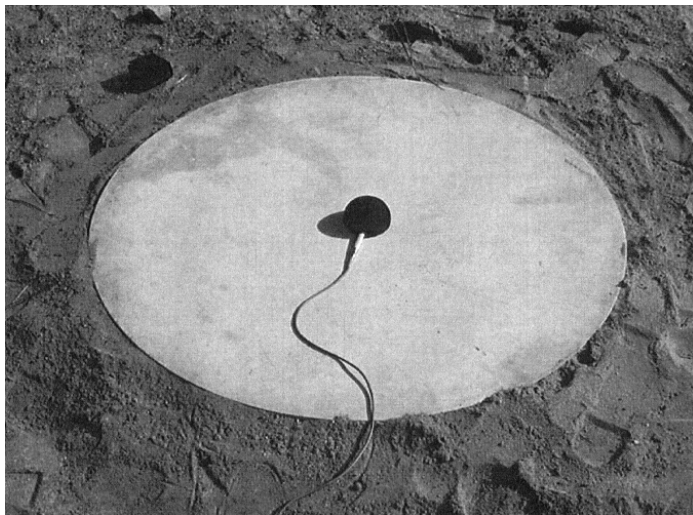


Bild 2. Mikrofonens placering på den runda skivan [11].

#### 4.4

### Apparater som mäter miljöförhållanden

För mätning av vindhastigheten används apparater vars precision är  $\pm 0,2$  m/s i området 4 m/s–12 m/s. Man ska samtidigt kunna mäta den genomsnittliga vindhastigheten synkroniserad med mätningen av ljudnivån.

Precisionen hos de apparater som används för att mäta vindriktningen ska vara  $\pm 5^\circ$  och hos dem som mäter temperaturen  $\pm 1^\circ\text{C}$ .

Precisionen hos de apparater som används för att mäta den relativa fuktigheten ska vara  $\pm 2\%$  och hos dem som mäter lufttrycket  $\pm 1$  kPa.

## 5 Mätning

För bedömning av bullernivån från vindkraftverk vid ett objekt som utsätts används främst denna anvisning. Dessutom följs till tillämpliga delar anvisningen i referens [2] om mätning av miljöbuller.

Storheten som mäts är medelljudnivån  $L_{Aeq,T}$  som motsvarar tiden  $T$ . Det rapporterade resultatet fastställs på basis av kortvariga (vanligen 1 minut långa) ljudtrycksnivåer uppmätta vid olika vindhastigheter.

Mätningen av buller från vindkraftverk kan begränsas av bakgrundsbuller som orsakas av vinden, såsom:

- vindbrus i mikrofonen;
- ljud i växtlighet (träd, buskar) eller konstruktioner som orsakas av luftströmmar;
- ljud som uppstår på grund av vågor orsakade av vinden och vattenströmmar.

Utöver dessa kan bakgrundsbuller också orsakas av andra ljudproducerande källor, såsom trafik, industri, mänsklig aktivitet, vilket bör beaktas under mätningen eller hanteringen av mätresultaten (korrigering för bakgrundsbuller).

Vid mätning av medelljudnivån  $L_{Aeq,T}$  antas att det ljud som vindkraftverket producerar är en funktion av vindhastigheten som råder på den plats där vindkraftverket finns och att bakgrundsbullret är en funktion av vindhastigheten som råder vid mätplatsen.

Vindhastigheten kan anges antingen som vindhastigheten på 10 m höjd eller på vindkraftverkets navhöjd. Som målvärde för vindhastigheten används 8 m/s som råder på 10 m höjd, ifall andra vindhastigheter inte på goda grunder förutsatts i mätningarna och en tillförlitlig uppskattning av ljudtrycksnivån med ett målvärde som motsvarar hastigheten 8 m/s kan ges.

### 5.1

#### Mätmetoder

Bullernivån som ett vindkraftverk producerar kan vara i samma storleksklass som bakgrundsbullrets nivå och i vissa fall också lägre. Nedan presenteras tre metoder för att mäta buller från ett vindkraftverk eller flera vindkraftverk i ett vindkraftverksområde i olika situationer. Man väljer den metod som är mest ändamålsenlig för att uppnå målet med mätningen.

### **Metod A: Mätning av bullernivån från ett vindkraftverk.**

Bullernivån som produceras av vindkraftverket och ljudkällor som genererar bakgrundsbuller mäts vid olika vindhastigheter. Vindhastigheten och bullernivån mäts samtidigt och på samma plats. Därefter stoppas vindkraftverket och bakgrundsbullrets nivå och vindhastigheten mäts samtidigt. På basis av mätresultaten definieras den bullernivå som vindkraftverket producerar.

Mätresultaten kan användas till exempel för att jämföra bullernivån som produceras av kraftverket med det planerade eller karaktäristiska värdet.

### **Metod B: Mätning av bullernivån som vindkraftverket och bakgrundsbullret tillsammans producerar vid målvärdet för vindhastigheten.**

Bullernivån som vindkraftverket och källorna till bakgrundsbuller producerar mäts vid mät-punkten. Vindhastigheten mäts vid vindkraftverket genom att antingen använda en anemometer eller definiera vindhastigheten med hjälp av vindkraftverkets eleffekt och effektkurva. Vindhastigheten modifieras så att den motsvarar en höjd på 10 meter eller vindkraftverkets navhöjd. Bullernivån mäts vid olika vindhastigheter och mätresultaten presenteras punktvis som en funktion av den korrigerade vindhastigheten. Bullernivåpunkterna approximeras på en rak linje och den bullernivå som råder vid vindens målvärde avläses från linjen.

Siffervärdet som fås med metoden kan anses vara den övre gränsen för bullernivån som vindkraftverket producerar vid målvärdet för vindhastigheten. Det uppmätta resultatet kan användas för att konstatera att bullernivån som vindkraftverket producerar är mindre än det planerade eller karaktäristiska värdet. Resultatet kan inte användas för att konstatera att det planerade eller karaktäristiska värdet överskrids.

### **Metod C: Mätning av den bullernivå som vindkraftverket producerar vid målvärdet för vindhastigheten.**

Bullernivån som vindkraftverket och källorna till bakgrundsbuller producerar mäts vid mät-punkten. Samtidigt mäts vindhastigheten både nära vindkraftverket och vid mätpunkten för bullernivån. Bakgrundsbullrets nivå mäts på samma sätt när vindkraftverket står stilla. Båda de uppmätta bullernivåerna presenteras som en funktion av den vindhastighet som uppmäts vid mätpunkten. Bakgrundsbullernivåerna uppskattas på en kurva med hjälp av regression och bullernivån som vindkraftverket produceras definieras punktvis.

Vindhastigheterna som uppmäts nära vindkraftverket modifieras vid behov så att de motsvarar samma höjd som har använts vid definieringen av vindhastighetens målvärde (kapitel 5.3.4). De korrigerade bullernivåerna som vindkraftverket själv producerar ritas som en funktion av vindhastigheten. Bullernivåpunkterna approximeras på en rak linje och den bullernivå som råder vid vindhastighetens målvärde avläses från linjen. Som målvärde för vindhastigheten används vindhastigheten 8 m/s (på referenshöjden 10 m).

Siffervärdet som fås med metoden kan användas för att jämföra bullernivån som vindkraftverket producerar med exempelvis det planerade eller det karaktäristiska värdet även i en situation där bullernivån har definierats i förhållande till vindhastigheten som råder nära vindkraftverket.



## 5.2

### Mätpunkter

Mätpunkterna väljs på basis av mätningens syfte (fastställande av bullrets planerade och karaktäristiska värden, jämförelse mellan beräkningsresultat etc.). Miljöförhållandena vid mätplatsen under mätningen kan påverka valet av mätpunkter och placeringen av den mikrofon som används vid mätningen.

Mätningarna kan utföras antingen genom att placera mikrofonen i en ställning på 1,5 meters höjd eller genom att använda en mätskiva som placeras på marken (bild 2). Mikrofonen kan också placeras på en skiva som monteras på byggnadens yttervägg. Om man använder en mikrofon som placeras på en skiva ska mätresultaten korrigeras så att de beaktar skivans inverkan. Korrigeringens storlek är i varje fall – 6 dB. Användning av en mikrofon som placeras i en ställning rekommenderas när bakgrundsbullrets nivå är minst 3 dB lägre än den bullernivå som vindkraftverket producerar och avståndet mellan mikrofonen och lodräta ytor som reflekterar ljud är tillräckligt stort. För att bakgrundsbullrets nivå ska kunna utredas måste vindkraftverket stoppas. Mikrofonen placeras så att det mellan den och vindkraftverket som är föremål för mätningen finns så få hinder som möjligt som påverkar ljudets fortplantning, t.ex. byggnader eller stora träd. Om det är möjligt väljs placeringen av mikrofonen också så att det inte finns någon växtlighet som orsakar bakgrundsbuller alldeles intill mikrofonen.

Om bakgrundsbullrets nivå är mindre än 3 dB lägre än den bullernivå som vindkraftverket producerar rekommenderas användning av en skiva placerad på marken som mikrofonunderlag (kapitel 4.3). Genom att använda en skiva är det möjligt att minska det brus som vinden orsakar i mikrofonen.

Vid val av mätpunkter ska även referens [2] beaktas.

## 5.3

### Bestämning av vindhastigheten vid vindkraftverket

Bestämningen av den vindhastighet som råder när mätningarna utförs bör i första hand basera sig på eleffekten och effektkurvan som har uppmätts för vindkraftverket. Om ingen effektkurva finns tillgänglig kan vindhastigheten bestämmas med hjälp av en anemometer som har placerats på navhöjd eller minst 10 meters höjd.

#### 5.3.1

#### Bestämning av vindhastigheten med hjälp av vindkraftverkets eleffekt och effektkurva

Vindhastigheten kan bestämmas genom att mäta den eleffekt som vindkraftverket producerar under en tidsperiod som motsvarar mätningstiden för varje separat bullernivå. För detta behövs vindkraftverkets spårbara effektkurva, som meddelas av tillverkaren. Av effektkurvan framgår den eleffekt som vindkraftverket producerar vid olika vindhastigheter. Det vindkraft-

verk som är föremål för mätningen ska ha samma inställningar som det vindkraftverk som har använts vid bestämningen av effektkurvan. Uppgifterna i effektkurvan ska motsvara temperaturen 15 °C och lufttrycket 101,3 kPa. Om mätningarna har utförts under andra förhållanden, ska dessa förhållandens inverkan beaktas.

#### 5.3.2

### Bestämning av vindhastigheten med hjälp av en anemometer monterad på motorkåpan

Vindhastigheten som råder under mätningarna mäts med hjälp av en anemometer monterad på vindkraftverkets maskinrum (nacelle).

#### 5.3.3

### Bestämning av vindhastigheten med hjälp av en anemometer placerad på 10 meters höjd

Om det inte är möjligt att mäta vindhastigheten på vindkraftverkets navhöjd, kan vindhastigheten mätas med hjälp av en anemometer placerad på minst 10 meters höjd. Anemometern ska placeras på vindkraftverkets vindsida.

#### 5.3.4

### Normalisering av vindhastigheter uppmätta på olika höjder

Vindhastigheter som har uppmätts på olika höjder ska normaliseras för att motsvara samma höjd, så att de kan jämföras. Som jämförelsevärde kan man använda 10 meters höjd eller vindkraftverkets navhöjd. Korrigeringen görs genom att anta att vindhastighetsprofilen är logaritmisk.

Vindhastigheten  $v_h$  uppmätt på navhöjd kan omvandlas till 10 meters höjd med en formel ( $v_{10}$ )

$$v_{10} = v_h \cdot \frac{\ln \frac{z_{ref}}{z_0}}{\ln \frac{h}{z_0}} \quad (5.3.1)$$

där

$h$  är vindkraftverkets navhöjd (m)

$z_0$  är markgrovleken, tabell 1

$z_{ref}$  är referenshöjden 10 m.

Tabell 1. Grovleken hos olika typer av markytor (skrovlighet)

| Typ av markyta  | Grovlek $z_0$ (m) |
|---|-------------------|
| Vatten, snö, sand   | 0,0001            |
| Öppen slät mark, bar markyta, klippt gräs                 | 0,01              |
| Odlingsmark med lite växtlighet                           | 0,05              |
| Bostadsområde, små städer, områden med tätvuxna höga träd | 0,3               |

#### 5.4

### Mätning av vindens hastighet och riktning vid mätpunkten

Vindhastigheten vid mätpunkten mäts på en representativ och öppen plats i närheten av mikrofonen och på minst 10 meters höjd över markytan.

Vindriktningen bestäms vid samma punkt som vindhastigheten. Om vindhastigheten mäts vid både vindkraftverket och mätpunkten räcker det om vindriktningen mäts enbart vid vindkraftverket.

Vindriktningen från det närmaste vindkraftverket mot mätpunkten (det område som utsätts för buller) ska vara  $\pm 45^\circ$ . Vindriktningen under mätningen väljs så att så många som möjligt av vindkraftverken i vindkraftverksområdet ligger inom vinkeln  $\pm 45^\circ$ .

Av välgrundade orsaker kan mätningar även göras i andra vindriktningar. På objekt som utsätts för buller görs ytterligare mätningar i den vindriktning i vilken bullret har konstaterats orsaka betydande störningar.

Ett lågfrekvent signifikant pulserande ("mullrande" amplitudmodulering), som gör bullret från vindkraftverk mer störande, förekommer vanligen på medvindssidan av ett vindkraftverk. En "brusande" amplitudmodulering uppträder vanligen som kraftigast vid  $90^\circ$  vinkel mot medvindsriktningen. Den synkrona rotationen hos flera vindkraftverk kan orsaka ett signifikant pulserande även i andra riktningar.

#### 5.5

### Rådande väderförhållanden under mätningarna

Mätningarna utförs under följande väderförhållanden när mätresultaten jämförs med modellerade bullernivåer:

- vindhastigheten är samma som vindhastighetens målvärde (om målvärdet tillämpas);
- vindriktningen är  $\pm 45^\circ$  från det närmaste vindkraftverket och från så många andra enskilda vindkraftverk som möjligt i vindkraftsområdet till mätpunkten (det område som utsätts för bullret). Vid behov görs mätningar även i andra vindriktningar;
- den lodräta temperaturgradienten  $dT/dz$  ligger inom området  $-0,05^\circ\text{C}/\text{m} < dT/dz < 0,05^\circ\text{C}/\text{m}$ .

Kravet gällande temperaturgradienten uppfylls vanligtvis då:

- mätningarna utförs nattetid (tiden mellan en timme efter solnedgången och en timme före soluppgången);
- mätningarna utförs dagtid (tiden mellan en timme efter soluppgången och en timme före solnedgången), då molnigheten  $> 4/8$ . Molnigheten ligger då mellan tämligen klart till halvmulet.

I Finland har årstiden och det geografiska läget en betydande inverkan på tidpunkten för soluppgången och solnedgången, vilket ska beaktas i uppfyllandet av kravet gällande temperaturgradienten.

I andra fall än jämförelsefall utförs mätningen av bullernivån i sådana väderförhållanden under vilka störningen som bullret orsakar kan observeras vid det objekt som utsätts för bullret.

## 5.6

### Mätningarnas utförande

Mätningarna kan utföras på tre sätt (kapitel 5.1). Med varje metod sparas mätsignalerna för bullernivå och vindhastighet som har uppmätts samtidigt, så att det är möjligt att göra en noggrannare analys av resultaten i ett senare skede.

#### 5.6.1

##### Metod A

När vindkraftverket är igång mäts medelljudnivån  $L_{AeqT}$  och vindhastigheten samtidigt vid mätpunkten och medelvärdena för dessa definieras för samma tidsperiod. Den rekommenderade mätningstiden  $T$  för varje separat mätning är 1 minut. Antalet separata mätningar ska vara minst 10 och den totala mätningstiden ska vara minst 30 minuter.

Bakgrundsbullrets nivå mäts när vindkraftverket står stilla innan mätningen av vindkraftverkets bullernivå utförs eller genast efter mätningen av bullernivån. Medan mätningarna av bakgrundsbullret utförs mäts samtidigt också vindhastigheten vid mätpunkten på samma sätt som vid mätning av vindkraftverkets bullernivå.

Om ett målvärde för vindhastigheten har fastställts ska minst tre av mätresultaten vara större än siffervärdet och tre av mätresultaten ska vara mindre än siffervärdet så att den största avvikelser från målvärdet uppgår till  $\pm 2$  m/s.

#### 5.6.2

##### Metod B

När vindkraftverket är igång mäts medelljudnivån  $L_{AeqT}$  och vindhastigheten samtidigt vid mätpunkten och medelvärdena för dessa definieras för samma tidsperiod. Den rekommenderade mätningstiden  $T$  för varje separat mätning är 1 minut. Antalet separata mätningar ska vara minst

10. Av dessa ska minst tre av mätresultaten vara större än siffervärdet och tre av mätresultaten ska vara mindre än siffervärdet så att den största avvikelsen från målvärdet uppgår till  $\pm 2$  m/s.

Den totala mätningstiden ska vara minst 30 minuter och minst 10 minuter av tiden ska resultatet vara under och ovanför målvärdet.

### 5.6.3

## Metod C

När vindkraftverket är igång mäts medelljudnivån  $L_{AeqT}$  vid mätpunkten och samtidigt mäts vindhastigheterna vid vindkraftverket och mätpunkten. Medelvärdena för dessa definieras för samma tidsperiod. Den rekommenderade mätningstiden  $T$  för varje separat mätning är 1 minut. Antalet separata mätningar ska vara minst 10. Av dessa ska minst tre av mätresultaten vara större än siffervärdet och tre av mätresultaten ska vara mindre än siffervärdet så att den största avvikelsen från målvärdet uppgår till  $\pm 2$  m/s.

Den totala mätningstiden ska vara minst 30 minuter och minst 10 minuter av tiden ska resultatet vara under och ovanför målvärdet.

När vindkraftverket står stilla mäts bakgrundsbullrets nivå  $L_{AeqT}$  före mätningen av vindkraftverkets bullernivå eller genast efter mätningen av bullernivån. Medan mätningarna av bakgrundsbullret utförs mäts samtidigt också vindhastigheten vid mätpunkten på samma sätt som vid mätning av vindkraftverkets bullernivå.

### 5.7

## Korrigerig för bakgrundsbulle

Bakgrundsbullret mäts när vindkraftverket står stilla genom att man använder samma mättiler, antal mätspektrum och vindhastighetsområden som vid mätningar under drift.

Det uppmätta bakgrundsbullrets energimedelvärden definieras vid olika vindhastigheter och dessa värden används för att korrigera ljudtrycksnivåerna  $L_{Aeq,free}$  som har uppmätts vid vindkraftverket enligt formeln 5.6.1.

$$L_{Aeq,corr} = 10 \cdot \lg \left( 10^{\frac{L_{Aeq,free}}{10}} - 10^{\frac{L_n}{10}} \right) \quad (5.6.1)$$

där

$L_{Aeq,corr}$  är den bullernivå som vindkraftverket producerar (korrigerat värde)

$L_{Aeq,free}$  är den bullernivå som vindkraftverket och bakgrundsbullret tillsammans orsakar (uppmätt värde)

$L_n$  är den genomsnittliga bakgrundsbullernivån i varje vindhastighetsområde.

När  $L_{Aeq,free} - L_n$  är i intervallet 3 – 6 dB ska en anmärkning om detta göras i de korrigerade värdena. Om  $L_{Aeq,free} - L_n$  är 3 dB eller mindre, kan värdet  $L_{Aeq,free} - 3$  dB anses vara den övre gränsen för den bullernivå som vindkraftverket producerar.

## Mätningar när bakgrundsbullrets nivå är hög

Vid mätningar av bullernivån som utförs på avstånd från vindkraftverket kan bakgrundsbullret ha en stor inverkan på mätresultatet. I vissa fall förutsätts speciella åtgärder för att bakgrundsbullrets inverkan ska kunna elimineras från mätresultaten. Nedan presenteras metoder för att minska bakgrundsbullrets inverkan.

### 5.8.1

#### Ändring av tidpunkten för mätningen

Bakgrundsbullret kan variera under olika tider på dygnet. Vanligen är bakgrundsbullret mindre nattetid. I situationer där bakgrundsbullret är för högt på dagen kan mätningarna utföras på natten.

### 5.8.2

#### Ändring av mikrofonens placering

Om man upptäcker att det uppstår för mycket bakgrundsbuller i närheten av mikrofonen (exempelvis buller som vinden orsakar i växtligheten), kan mikrofonens placering ändras under förutsättning att omständigheterna på den nya platsen motsvarar omständigheterna på den ursprungliga mätpunkten. Om mikrofonens placering ändras, kan det också vara nödvändigt att ändra mätplatsen för vindhastigheten.

### 5.8.3

#### Användning av ett tvådelat vindskydd

I situationer där vindens brus i mikrofonen bildar det huvudsakliga bakgrundsbullret kan det vara nödvändigt att använda ett sekundärt vindskydd (kapitel 4.2). Vindskyddet kan påverka det uppmätta ljudets frekvensrespons. Dämpningen som vindskyddet möjligen förorsakar ska beaktas genom en korrigering av mätresultatet.

### 5.8.4

#### Användning av en mätskiva

Resultaten som fås med en mätskiva (både på marken och monterad på väggen) korrigeras så att de motsvarar värden på fritt fält med formeln

$$L_{free} = L_{board} - 6dB \quad (5.7.1)$$

där

$L_{free}$  är den korrigerade medelljudnivån  $L_{Aeq,T}$

$L_{board}$  är den med mätskivan uppmätta medelljudnivån  $L_{Aeq,T}$ .

#### 5.8.5

### Mätningar vid lägre vindhastighet

Vindkraftverkets bullernivå och bakgrundsbullrets nivå beror på vindhastigheten. I vissa fall minskar bakgrundsbullrets nivå om vindhastigheten minskar mer än vindkraftverkets bullernivå. Det är möjligt att förbättra mätningens signal/brusförhållande genom att utföra mätningarna vid mindre vindhastigheter. Eftersom ljudets fortplantning från vindkraftverket till mätpunkten är beroende av vindhastigheten, bör vindhastigheten inte avvika med mer än 2 m/s från målvärdet.

Det är möjligt att utföra mätningar vid lägre vindhastigheter med användning av mätmetod C om vindriktningen förblir den samma och man känner till vindkraftverkets effekt som en funktion av vindhastigheten. Mätnoggrannheten försämras dock en aning. Resultat som uppmäts vid lägre vindhastigheter måste korrigeras genom att beakta den ändrade vindhastighetens inverkan.

#### 5.8.6

### Mätningar närmare vindkraftverket

En minskning av mätavståndet förbättrar i regel signal/brusförhållandet. Vid mätning av bullernivån från ett enskilt vindkraftverk kan mätavståndet minskas med 25 procent, förutsatt att

- avståndet till den nya mätpunkten överskrider värdet  $1,5 \cdot (H+D/2)$ , där H är vindkraftverkets navhöjd och D är rotores diameter;
- vinkeln mellan linjen från mätpunkten till vindkraftverkets nav och markytan förblir den samma  $\pm 5^\circ$  (vid mätningar i medvind  $\pm 10^\circ$ );
- mikrofonen är på samma höjd över markytan som vid den ursprungliga mätpunkten;
- terrängens typ och markytans akustiska impedans är de samma som vid den ursprungliga mätpunkten;
- den nya platsen är likadan som den ursprungliga platsen vad gäller möjliga skuggningar av ljudet från vindkraftverket.

Resultaten av mätningar som har utförts närmare vindkraftverket ska korrigeras beräkningsmässigt genom att beakta det kortare mätavståndet. Korrigeringen görs med formeln

$$L_{Aeq,corr} = L_{Aeq,red} - 20 \lg \left( \frac{R_1}{R_2} \right) \text{ dB} \quad (5.7.2)$$

där

$L_{Aeq,corr}$  är den korrigerade bullernivån

$L_{Aeq,red}$  är den bullernivå som har uppmäts närmare vindkraftverket (korrigerad med avseende på mätskivan och bakgrundsbullret)

$R_1$  är avståndet mellan vindkraftverkets nav och den ursprungliga mätpunkten

$R_2$  är avståndet mellan vindkraftverkets nav och den nya mätpunkten.

## 5.9

### Mätning av lågfrekvent buller

Stora vindkraftverk kan producera lågfrekvent ljud, som kan vara svårt att mäta utomhus på grund av det lågfrekventa brus som vinden ger upphov till i mikrofonen.

Mätningen av den lågfrekventa bullernivån görs på motsvarande sätt som mätningen av den mer högfrekventa bullernivån som vindkraftverket producerar. Vid mätningen ska ett sekundärt vindskydd särskilt avsett för mätning av lågfrekvent buller användas. Det sekundära vindskyddet orsakar en dämpning av det uppmätta bullret, vilket ska beaktas. Utöver detta ska den apparatur som används vid mätningen ha en frekvensrespons som är linjär upp till 4 Hz.

Mätningarna utförs per 1/3-oktaver på medelfrekvenserna 20 Hz – 200 Hz utan A-betoning (i det linjära området).

Det är ändamålsenligt att spara alla mätsignaler (samtidiga data för vindhastighet och ljud) som fås vid mätningar av lågfrekvent buller och analysera resultaten senare.

## 5.10

### Bestämning av bullrets smalbandighet

En mätning av smalbandigheten görs vid en bedömning av smalbandigheten/tonaliteten hos det buller som vindkraftverket producerar vid det utsatta objektet. Två metoder kan användas för mätningen. Med metod 1 används ett smalbandigt RMS-spektrum och med metod två används dessutom enstaka kortvariga spektra. Metoderna ger samma resultat för stationära signaler. Smalbandigheten bestäms i första hand på basis av sparade mätsignaler i enlighet med standarden IEC 61400-11 [11].

Om bullret är smalbandigt sanktioneras mätresultatet. Till resultatet adderas ett siffervärde enligt bestämmelsen (t.ex. 5 dB) innan resultatet jämförs med det planerade eller karaktäristiska värdet.

## 5.10.1

### Mätpunkter

Smalbandiga spektra mäts vid samma mätpunkter som används vid de egentliga mätningarna (där mikrofonen och anemometern är placerade).

## 5.10.2

### Metod 1

Mätningarna görs med användning av ljudnivåmätarens linjära inställning. Eventuella övriga ljudkällor får inte påverka mätresultatet. När vindkraftverkets rotor rotter med standardhastighet mäts effektivvärdena för ljudtrycket under 1–2 minuter. Vid användning av en FFT-analysator görs mätningarna med Hanning-fönster.

Frekvensupplösningen som används i mätningarna är beroende av den rena tonens frekvens enligt tabell 2.



Tabell 2. Frekvensupplösning i olika frekvensområden.

| Den rena tonens frekvens (Hz) | Frekvensupplösning (Hz) |
|-------------------------------|-------------------------|
| < 2000                        | 2,0 – 5,0               |
| ≥ 2000                        | 2,0 – 12,5              |

Vid målvärdet för vindhastigheten, när det tillåtna variationsintervallet är  $\pm 1$  m/s, mäts minst fem RMS-spektra. Tilläggs-mätningar kan göras vid vindhastigheter med vilka man bedömer att de rena tonerna är mest betydelsefulla.

När vindkraftverkets rotorhastighet varierar mäts minst 30 smalbandiga spektra (mätningstid 10 sekunder) vid målvärdet för vindhastigheten och det tillåtna variationsintervallet för hastigheten är  $\pm 1$  m/s.

Övriga ljudkällors möjliga inverkan på mätresultatet ska förhindras genom val av mätningsskäligheter eller så ska ljudkällornas inverkan elimineras från mätresultaten.

#### 5.10.3

### Metod 2

Utöver mätningarna enligt kapitel 5.9.2 mäts kortvariga, tillfälliga spektra genom att använda tidsbetoning F. För varje 1–2 minuter lång period definieras minst 50 kortvariga spektra.

#### 5.11

### Bestämning av bullrets impulsart

Bullrets impulsart och signifikans bestäms enligt Nordtestmetoden NT ACOU 112 [13]. Bullret är impulsartat om den uppskattade korrigeringen  $K_i$  är större än 3 dB. Bullrets impulsart bestäms av registrerade och representativa ljudprov.

Om bullret är impulsivt sanktioneras mätresultatet. Till resultatet adderas ett siffervärde enligt bestämmelsen (t.ex. 5 dB) innan resultatet jämförs med det planerade eller karaktäristiska värdet.

#### 5.12

### Bestämning av bullrets signifikanta pulserande (amplitudmodulering)

Bullrets signifikanta pulserande (amplitudmodulering) och graden av det bestäms av de signaler som registrerats under mätningarna.

Det finns inte för närvarande någon standardiserad metod för bestämning av amplitudmoduleringen i ett vindkraftverk eller referensvärde för att verifiera signifikant pulserande (excess amplitude modulation).

Graden av signifikant pulserande i den bullernivå som ett vindkraftverk eller flera vindkraftverk i ett vindkraftsområde alstrar kan emellertid bestämmas enligt metoden i hänvisning [14] (Modulaatioiden ja alukkeiden havaitsemisen – Observation av moduleringar och ansatser).

Det finns ingen av vetenskapssamfundet allmänt godkänd bedömningsskala mellan graden av signifikant pulserande i bullernivån som ett vindkraftverk producerar vid det utsatta objektet och hur störande bullret är. Man kan tydligt höra amplitudmoduleringen i en ljudsignal om dess moduleringsgrad överstiger 20 % (modulationsdjupet är då över 3 dB) och fluktuationsfrekvensen ligger mellan 0,5 och 30 Hz. Hörbarheten förutsätter att ljudsignalens totalnivå är tillräckligt hög.

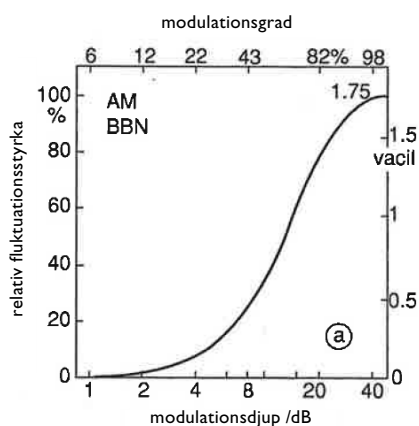


Bild 3. Moduleringsgrad [14].

Med beaktande av försiktighetsprincipen kan man uppskatta att bullret till sin natur är signifikant pulserande (amplitudmodulerat) när ljudet från ett vindkraftverk har ett modulationsdjup som överstiger 3 dB och moduleringens fluktuationsfrekvens ligger mellan 0,5 och 30 Hz. Det är då ändamålsenligt att beakta sanktionen i mätresultatet.

Om bullret är signifikant pulserande sanktioneras mätresultatet. Till resultatet adderas ett siffrvärde enligt bestämmelsen (t.ex. 5 dB) innan resultatet jämförs med det planerade eller karaktäristiska värdet.

## Mätningar inomhus

Vid buller mätningar som utförs inomhus följs anvisningarna i hänvisningarna [2] och [12]. Vid mätning av lågfrekvent buller inomhus följs dessutom tilläggsanvisningarna som ges nedan.

Lågfrekvent buller mäts vid tre punkter på 1,5 meters höjd ovanför golvytan. Två av dessa finns i det område där det lågfrekventa bullret bedöms vara som kraftigast och ett i hörnet av rummet (på ett avstånd mellan 0,5 och 1 meter från väggarna). Mätningarna utförs i frekvensområdet 20–200 Hz och det rapporterade resultatet är energimedelvärdet av resultaten från de tre mätpunkterna.

Bullrets planerade och karaktäristiska värden bestäms på basis av hänvisningarna [2] och [12]. Det är möjligt att utnyttja ytterligare anvisningar för bedömning av frågor förknippade med uträkningen av lågfrekvent buller.

## 6 Rapportering av mätningarna

Uppgifterna om mätningarna ska beskrivas så noggrant som möjligt. Alla mätsignaler sparas under mätningarna. Följande uppgifter ska rapporteras:

|   |                 |                 |                 |  |                 |                 |                 |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|--|-----------------|-----------------|-----------------|
| UPPGIFTER OM RAPPORTEN OCH OM RAPPORTÖREN                 |                 |                 |                 | * preciserande uppgifter kan ges på en karta eller i andra bilagor |                 |                 |                 |
| Mätningsrapportens nummer/identifierare:                  |                 |                 |                 | Mättidpunkt: kl.:  |                 |                 |                 |
| Upphovsman/organisation, kontaktuppgifter                 |                 |                 |                 | Datum för godkännande av rapporten:                                |                 |                 |                 |
| ANSVARIGA   |                 |                 |                 |  |                 |                 |                 |
| Mätare:   |                 |                 |                 | Granskad av/godkänd av:  |                 |                 |                 |
| APPARATER SOM ANVÄNTS FÖR MÄTNINGARNA                     |                 |                 |                 |  |                 |                 |                 |
| Tillverkarens namn:                                       |                 |                 |                 | Mätartyp:  |                 |                 |                 |
| Mätarens serienummer:                                     |                 |                 |                 |  |                 |                 |                 |
| Datum för kalibrering av apparaturens och kalibrerare*:   |                 |                 |                 |  |                 |                 |                 |
| Uppgifter om mikrofonsens placeringsskiva (bild*):        |                 |                 |                 |  |                 |                 |                 |
| Uppgifter om det sekundära vindskyddet*:                  |                 |                 |                 |  |                 |                 |                 |
| Metod och apparatur för bestämning av vindhastigheten:    |                 |                 |                 |  |                 |                 |                 |
| Placering av anemometern och vindriktningsmätarna*:       |                 |                 |                 |  |                 |                 |                 |
| UPPGIFTER OM VINDKRAFTVERKET*                             |                 |                 |                 |  |                 |                 |                 |
| Tillverkare:  |                 |                 |                 | Typ:   |                 | Serienummer:    |                 |
| Nominell effekt:  |                 | Navhöjd:        |                 | Rotordiameter:   |                 | Torntyp:        |                 |
| Uppgifter om terrängen kring mätpunkten och kraftverket*: |                 |                 |                 |  |                 |                 |                 |
| VINDKRAFTVERKETS POSITION X,Y (koordinatsystem)*:         |                 |                 |                 |  |                 |                 |                 |
| Kraftverk<br>1:   | Kraftverk<br>2: | Kraftverk<br>3: | Kraftverk<br>4: | Kraftverk<br>5:  | Kraftverk<br>6: | Kraftverk<br>7: | Kraftverk<br>8: |
| X:  | X:              | X:              | X:              | X:   | X:              | X:              | X:              |
| Y:  | Y:              | Y:              | Y:              | Y:   | Y:              | Y:              | Y:              |

|   |                   |                                       |              |   |              |                   |              |
|---|-------------------|---------------------------------------|--------------|---|--------------|-------------------|--------------|
| TYP AV MARKYTA:   |                   |                                       |              |   |              |                   |              |
| Kraftverk 1:  | Kraftverk 2:      | Kraftverk 3:                          | Kraftverk 4: | Kraftverk 5:  | Kraftverk 6: | Kraftverk 7:      | Kraftverk 8: |
| MÖJLIGHET ATT PÅVERKA VINDKRAFTVERKETS BULLERUTSLÄPP UNDER DRIFT OCH ÅTGÄRDENS INVERKAN PÅ BULLRET: |                   |                                       |              |   |              |                   |              |
| Reglering av bladvinkeln  |                   | Rotationshastighet                    |              | Annat, vad  |              |                   |              |
| Ja  | dB                | Ja                                    | dB           |   |              |                   | dB           |
| Nej   |                   | Nej                                   |              |   |              |                   | dB           |
| MÄTPLATSENS POSITION*   |                   |                                       |              |   |              |                   |              |
| MÄTPUNKTENS POSITION X,Y (koordinatsystem)*:  |                   |                                       |              |   |              |                   |              |
| Mätpunkt 1:   |                   | Mätpunkt 2:                           |              | Mätpunkt 3:   |              | Mätpunkt 4:       |              |
| Mikrofonens höjd:   |                   | Mikrofonens höjd:                     |              | Mikrofonens höjd:                                     |              | Mikrofonens höjd: |              |
| TYP AV MARKYTA:   |                   |                                       |              |   |              |                   |              |
| Typ av markyta  | Grovlek $z_0$ [m] | Uppskattad procentandel i området [%] |              | Markytans grovlek på platsen där vindhastigheten mäts |              |                   |              |
| Vatten, snö, sand   | 0,0001            | MP 1:<br>MP 2:                        |              |   |              |                   |              |
| Öppen slät mark, bar markyta, klippt gräs   | 0,01              | MP 1:<br>MP 2:                        |              |   |              |                   |              |
| Odlingsmark med lite växtlighet   | 0,05              | MP 1:<br>MP 2:                        |              |   |              |                   |              |
| Bostadsområde, områden med tätvuxna höga träd   | 0,3               | MP 1:<br>MP 2:                        |              |   |              |                   |              |
| TYPER AV BULLERKÄLLOR OCH POSITION FÖR BAKGRUNDSBULLRET*:   |                   |                                       |              |   |              |                   |              |
| Mätpunkt 1:   |                   | Mätpunkt 2:                           |              | Mätpunkt 3:   |              | Mätpunkt 4:       |              |
| POSITION FÖR BETYDANDE REFLEKTERANDE YTOR*:   |                   |                                       |              |   |              |                   |              |
| Mätpunkt 1:   |                   | Mätpunkt 2:                           |              | Mätpunkt 3:   |              | Mätpunkt 4:       |              |
| VÄDERUPPGIFTER*   |                   |                                       |              |   |              |                   |              |
| Relativ fuktighet:  |                   |                                       |              | Temperatur:   |              |                   |              |
| Lufttryck:  |                   |                                       |              | Molntäcke x/8:  |              |                   |              |
| Turbulens:  |                   |                                       |              | Solstånd:   |              |                   |              |
| Vindhastighet och -riktning:  |                   |                                       |              | Normaliserad vindhastighet:                           |              |                   |              |
| 10 m:   | m:                | m:                                    | m:           | m:  | m:           | m:                | m:           |

|  |     |             |     |   |     |             |     |
|--|-----|-------------|-----|---|-----|-------------|-----|
| <b>MÄTNING OCH MÄTRESULTAT</b>   |     |             |     |   |     |             |     |
| Mät- och provtagningsmetod:  |     |             |     |   |     |             |     |
| Kalibreringsresultat för mätanordningen före mätning:  |     |             |     |   |     |             |     |
| Mätpunkt 1:  |     | Mätpunkt 2: |     | Mätpunkt 3:                                 |     | Mätpunkt 4: |     |
| Kalibreringsresultat för mätanordningen efter mätning:   |     |             |     |   |     |             |     |
| Mätpunkt 1:  |     | Mätpunkt 2: |     | Mätpunkt 3:                                 |     | Mätpunkt 4: |     |
| Mätning och observation av särdrag i buller:   |     |             |     |   |     |             |     |
| Smalbandighet/Tonalitet  |     | Impulsart   |     | Signifikant pulserande (amplitudmodulering) |     | Annat, vad: |     |
| ja   | nej | ja          | nej | ja  | nej | ja          | nej |
| Bakgrundsbullrets styrka och inverkan på resultatet:   |     |             |     |   |     |             |     |
| Mätpunkt 1:  |     | Mätpunkt 2: |     | Mätpunkt 3:                                 |     | Mätpunkt 4: |     |
| <b>MÄTNING AV BULLER FRÅN VINDKRAFTVERK VID OBJEKT SOM UTSÄTTS</b>   |     |             |     |   |     |             |     |
| <b>METOD A:</b><br>Mätning av bullernivån från ett vindkraftverk   |     |             |     |   |     |             |     |
| Korrigerad bullernivå $L_{Aeq,corr}$ som vindkraftverket orsakar:  |     |             |     |   |     |             |     |
| Mätpunkt 1:  |     | Mätpunkt 2: |     | Mätpunkt 3:                                 |     | Mätpunkt 4: |     |
| <b>METOD B:</b><br>Mätning av bullernivån som vindkraftverket och bakgrundsbullret tillsammans producerar vid målvärdet för vindhastigheten. |     |             |     |   |     |             |     |
| Värde på fritt fält $L_{Aeq,free}$ för den totala bullernivån från ett vindkraftverk och bakgrundsbuller.                                    |     |             |     |   |     |             |     |
| Mätpunkt 1:  |     | Mätpunkt 2: |     | Mätpunkt 3:                                 |     | Mätpunkt 4: |     |
| <b>METOD C:</b><br>Mätning av den bullernivå som vindkraftverket producerar vid målvärdet för vindhastigheten.                               |     |             |     |   |     |             |     |
| Vindkraftverkets korrigerade bullernivå $L_{Aeq,corr}$ vid målvärdet för vindhastigheten:  |     |             |     |   |     |             |     |
| Mätpunkt 1:  |     | Mätpunkt 2: |     | Mätpunkt 3:                                 |     | Mätpunkt 4: |     |
| Vindkraftverkets korrigerade bullernivå $L_{Aeq,corr}$ som en funktion av vindhastigheten vid 10 meters höjd eller vindkraftverkets navhöjd: |     |             |     |   |     |             |     |
| Mätpunkt 1:  |     | Mätpunkt 2: |     | Mätpunkt 3:                                 |     | Mätpunkt 4: |     |
| Bakgrundsbullrets nivå som en funktion av vindhastigheten uppmätt vid mätpunkten   |     |             |     |   |     |             |     |
| Mätpunkt 1:  |     | Mätpunkt 2: |     | Mätpunkt 3:                                 |     | Mätpunkt 4: |     |

#### ÖVRIGA BILAGOR:

- 1) Vindkraftverkets effektkurva
- 2) Kartunderlag för vindkraftsområdet på vilket man kan urskilja terrängformationerna, markytans typ, kraftverkens och mätpunkternas position, positionen för de utsatta objekten samt positionen för eventuella funktioner som ger upphov till bakgrundsbuller
- 3) Plankarta över området
- 4) Bilder av mätplatsen, apparaturen osv.
- 5) Bedömning av bullernivån med hjälp av bullerutsläpp. Resultatens tillförlitlighet och representativitet.

| MÄTRESULTAT PER 1/3 OKTAV |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Hz                        | MP 1 | MP 2 | MP 3 | MP 4 | MP 5 | MP 6 | MP 7 |
| 20                        |      |      |      |      |      |      |      |
| 25                        |      |      |      |      |      |      |      |
| 31,5                      |      |      |      |      |      |      |      |
| 40                        |      |      |      |      |      |      |      |
| 50                        |      |      |      |      |      |      |      |
| 63                        |      |      |      |      |      |      |      |
| 80                        |      |      |      |      |      |      |      |
| 100                       |      |      |      |      |      |      |      |
| 125                       |      |      |      |      |      |      |      |
| 160                       |      |      |      |      |      |      |      |
| 200                       |      |      |      |      |      |      |      |
| 250                       |      |      |      |      |      |      |      |
| 315                       |      |      |      |      |      |      |      |
| 400                       |      |      |      |      |      |      |      |
| 500                       |      |      |      |      |      |      |      |
| 630                       |      |      |      |      |      |      |      |
| 800                       |      |      |      |      |      |      |      |
| 1000                      |      |      |      |      |      |      |      |
| 1250                      |      |      |      |      |      |      |      |
| 1600                      |      |      |      |      |      |      |      |
| 2000                      |      |      |      |      |      |      |      |
| 2500                      |      |      |      |      |      |      |      |
| 3150                      |      |      |      |      |      |      |      |
| 4000                      |      |      |      |      |      |      |      |
| 5000                      |      |      |      |      |      |      |      |
| 6300                      |      |      |      |      |      |      |      |
| 8000                      |      |      |      |      |      |      |      |
| 10000                     |      |      |      |      |      |      |      |

| LÅGFREKVENT BULLER   |      |      |      |      |  |  |  |
|--|------|------|------|------|--|--|--|
| A-vägda eller lineära bullernivåer utanför de utsatta objekten (byggnaderna) |      |      |      |      |  |  |  |
| HZ   | MP 1 | MP 2 | MP 3 | MP 4 |  |  |  |
| 20   |      |      |      |      |  |  |  |
| 25   |      |      |      |      |  |  |  |
| 31,5   |      |      |      |      |  |  |  |
| 40   |      |      |      |      |  |  |  |
| 50   |      |      |      |      |  |  |  |
| 63   |      |      |      |      |  |  |  |
| 80   |      |      |      |      |  |  |  |
| 100  |      |      |      |      |  |  |  |
| 125  |      |      |      |      |  |  |  |
| 160  |      |      |      |      |  |  |  |
| 200  |      |      |      |      |  |  |  |



## HÄNVISNINGAR

1. Tuulivoimamelun mittaustietotekniikan kehittäminen. (Utveckling av mätmetodik för vindkraftsbuller) Forskningsrapport VTT-R-04680-13.
2. Mätning av omgivningsbuller. Miljöministeriets miljöavdelning. Anvisning 1 1995. 81 s.
3. Tuulivoimaloiden melupäästön todentaminen mittaamalla. (Verifiering av bullerutsläpp från vindkraftverk genom mätning) Miljöförvaltningens anvisningar 3/2014.
4. IEA Recommended Practices for Wind Turbine Testing and Evaluation. 10. Measurement of Noise Immission from Wind Turbines at Noise Receptor Locations, first ed., 1997.
5. Mätning av bullerimmission från vindkraftverk. Elforsk rapport 98:24. October 1998.
6. Compliance Protocol for Wind Turbine Noise. Guideline for Acoustic Assessment and Measurement. Ontario Ministry of the Environment.
7. Measurement of Audible Noise from Wind Turbines - Phase 1 Report - Literature and Jurisdictional Review. Ontario Ministry of the Environment. 11 June 2010.
8. IEC 60942. Electroacoustics - Sound calibrators. 177 s.
9. IEC 61260. Electroacoustics - Octave-band and fractional-octave band filters.
10. IEC 61672-1:2002. Electroacoustics - Sound Level meters - Part 1: Specifications. 85 s.
11. IEC 61400-11. Wind turbines – Part 11: Acoustic noise measurement techniques. Edition 3.0 2012-11. International Electrotechnical Commission.
12. Social- och hälsovårdsministeriet. Helsingfors 2003. Anvisning om boendehälsa. Social- och hälsovårdsministeriets handböcker 2003:1. 93 s.
13. NT ACOU 211. Acoustics: Prominence of impulsive sounds and for adjustment of  $L_{Aeq}$ . Approved 2002-05. Nordtest.
14. Karjalainen, M. Kommunikaatioakustiikka. Esbo 2009. Aalto-universitetet, Institutionen för signalbehandling och akustik. 255 s.

## KUVAILEHTI

|  |   |                       |                                |  |
|--|---|-----------------------|--------------------------------|--|
| Julkaisija   | Ympäristöministeriö<br>Rakennetun ympäristön osasto   |                       | Julkaisu-aika<br>Helmikuu 2014 |  |
| Tekijä(t)  | Ympäristöministeriö   |                       |                                |  |
| Julkaisun nimi   | Tuulivoimaloiden melutason mittaaminen altistuvassa kohteessa<br>Mätning av bullernivån från vindkraftverk vid objekt som utsätts   |                       |                                |  |
| Julkaisusarjan nimi ja numero                                  | Ympäristöhallinnon ohjeita 4   2014   |                       |                                |  |
| Julkaisun teema  | Rakennettu ympäristö  |                       |                                |  |
| Julkaisun osat/<br>muut saman projektin<br>tuottamat julkaisut |   |                       |                                |  |
| Tiivistelmä  | <p>Tuulivoimaloiden melu poikkeaa muusta ympäristömelusta. Voimaloiden ääni voi sisältää erityispiirteitä, mitkä lisäävät melun häiritsevyyttä. Voimalat toimivat vain osan ajastaan nimellistehollaan, jolloin niiden melupäästö on suurin. Tuulivoimalan ääni syntyy korkealla, mikä vaikuttaa äänen vaimenemiseen sen edetessä etäälle voimalasta. Ääni ja äänenvoimakkuus vaihtelevat merkittävästi sääoloista riippuen melulle altistuvassa kohteessa.</p> <p>Ohjeessa esitetään menettelytavat tuulivoimalan tai tuulivoima-alueen tuulivoimaloiden aiheuttaman melutason mittaamiseksi ja arvioimiseksi melulle altistuvassa kohteessa.</p> <p>Ohjeessa annetaan tietoja mittausmenettelyistä, mittauksissa käytettävistä laitteista ja tulosten esittämistavasta. Mittaukset voidaan tehdä kaikissa suunnissa tuulivoimalan (tai tuulivoimalaryhmän) ympärillä.</p> <p>Ohjeen menettelytavat mahdollistavat äänitekniikan suunnittelun liittäminen tuulivoima-alueiden muuhun suunnitteluprosessiin ja hyväksymismenettelyyn.</p> |                       |                                |  |
| Asiasanat  | Melu, tuulivoimalat, ympäristömelu, mallintaminen, tuulivoimarakentaminen   |                       |                                |  |
| Rahoittaja/<br>toimeksiantaja                                  | Ympäristöministeriö   |                       |                                |  |
|  | 978-952-11-4277-2<br>ISBN (PDF)   |                       | 1796-1653<br>ISSN (verkkoj.)   |  |
|  | Sivuja<br>66  | Kieli<br>Suomi/Ruotsi | Luottamuksellisuus<br>julkinen |  |
| Julkaisun myynti/<br>jakaja                                    | Julkaisu on saatavana vain internetist.ä:<br>www.ym.fi/julkaisut  |                       |                                |  |
| Julkaisun kustantaja   | Ympäristöministeriö   |                       |                                |  |
| Painopaikka ja -aika   | Helsinki 2014   |                       |                                |  |

## PRESENTATIONSBLAD

|  |   |                          |
|--|---|--------------------------|
| Utgivare   | Miljöministeriet<br>Avdelningen för den byggda miljön   | Datum<br>Februari 2014   |
| Författare   | Miljöministeriet  |                          |
| Publikationens titel   | <b>Tuulivoimailoiden melutason mittaaminen altistuvassa kohteessa</b><br>Mätning av bullernivån från vindkraftverk vid objekt som utsätts   |                          |
| Publikationsserie och nummer                                 | Miljöförvaltningens anvisningar 4   2014  |                          |
| Publikationens tema  | Byggd miljö   |                          |
| Publikationens delar/ andra publikationer inom samma projekt |   |                          |
| Sammandrag   | <p>Bullret från vindkraftverk avviker från annat omgivningsbuller. Ljudet från vindkraftverken kan innehålla särdrag som ökar bullrets störande verkan. Ett kraftverk arbetar endast under en del av drifttiden vid sin nominella effekt, då bullerutsläppet (emissionen) är som störst. Ljudet från ett vindkraftverk uppstår på hög höjd, vilket påverkar hur ljudet dämpas när det fortplantar sig längre bort från kraftverket. Det ljud och den ljudstyrka som vindkraftverken alstrar varierar betydligt temporalt beroende på väderförhållandena.</p> <p>Anvisningen ger metoder för att mäta och bedöma bullernivån från ett vindkraftverk eller från flera vindkraftverk i ett vindkraftsområde vid ett objekt som utsätts för bullret.</p> <p>I anvisningen finns uppgifter om mätmetoder, den apparatur som ska användas och hur resultaten ska presenteras. Mätningar kan göras i alla riktningar kring ett vindkraftverk (eller en grupp vindkraftverk).</p> <p>Metoderna i anvisningen gör det möjligt att koppla ljudteknisk planering till den övriga planeringsprocessen och godkännandeförfarandet för vindkraftsområden.</p> |                          |
| Nyckelord  | Buller, vindkraftverk, omgivningsbuller, modellering, vindkraftsutbyggnad   |                          |
| Finansiär/ uppdragsgivare                                    | Miljöministeriet  |                          |
|  | 978-952-11-4277-2<br>ISBN (PDF)   |                          |
|  | 1796-1653<br>ISSN (online)  |                          |
|  | Sidantal<br>66  | Språk<br>Finska/ Svenska |
|  | Offentlighet<br>Offentlig   |                          |
| Beställningar/ distribution                                  | Publikationen finns tillgänglig endast på internet:<br><a href="http://www.ym.fi/julkaisut">www.ym.fi/julkaisut</a>   |                          |
| Förläggare   | Miljöministeriet  |                          |
| Tryckeri/tryckningsort och -år                               | Helsingfors 2014  |                          |

## DOCUMENTATION PAGE

|   |  |                                    |                                       |
|---|--|------------------------------------|---------------------------------------|
| <i>Publisher</i>  | Ministry of the Environment<br>Department of the Built Environment   | <i>Date</i><br>February 2014       |                                       |
| <i>Author(s)</i>  | Ministry of the Environment  |                                    |                                       |
| <i>Title of publication</i>                             | <b>Tuulivoimaloiden melupäästön todentaminen mittaamalla</b><br>(Measurement of wind turbine noise levels in exposed areas)  |                                    |                                       |
| <i>Publication series and number</i>                    | Environmental Administration Guidelines 4   2014   |                                    |                                       |
| <i>Theme of publication</i>                             | Built environment  |                                    |                                       |
| <i>Parts of publication/ other project publications</i> |  |                                    |                                       |
| <i>Abstract</i>   | <p>Noise from wind turbines differs from other environmental noise. The sound from wind turbines may include special characteristics that make the noise more annoying. Wind turbines are operated for only a part of their operational life at the rated power where noise emissions are at the maximum. The noise from wind turbines is produced high up, which will have an effect on the sound attenuation when the sound propagation occurs farther away from the wind turbines. Sound and sound levels fluctuate substantially in areas exposed to noise, depending on weather conditions.</p> <p>The guidelines provide procedures for measuring and assessing noise levels from wind turbines or wind farms in exposed areas.</p> <p>Additionally, the guidelines include information about measurement procedures, equipment used in measurements, and how the results will be presented. Measurements can be taken from each direction around the wind turbine (or a group of wind turbines).</p> <p>The procedures in the guidelines make it possible to link acoustic planning to other planning processes and approval procedures for wind turbine farms.</p> |                                    |                                       |
| <i>Keywords</i>   | Noise, wind turbines, environmental noise, modelling, construction of wind turbines  |                                    |                                       |
| <i>Financier/ commissioner</i>                          | Ministry of the Environment  |                                    |                                       |
|   | 978-952-11-4277-2<br>ISBN (PDF)  | 1796-1653<br>ISSN (online)         |                                       |
|   | <i>No. of pages</i><br>66  | <i>Language</i><br>Finnish/Swedish | <i>Restrictions</i><br>For public use |
| <i>For sale at/ distributor</i>                         | The publication is available only on the internet:<br><a href="http://www.ym.fi/julkaisut">www.ym.fi/julkaisut</a>   |                                    |                                       |
| <i>Financier of publication</i>                         | Ministry of the Environment  |                                    |                                       |
| <i>Printing place and year</i>                          | Helsinki 2014  |                                    |                                       |



Ohjeessa esitetään menettelytavat tuulivoimalan tai tuulivoima-alueen tuulivoimailoiden aiheuttaman melutason mittaamiseksi ja arvioimiseksi melulle altistuvassa kohteessa. Ohjeessa annetaan tietoja mittausmenettelyistä, mittauksissa käytettävistä laitteista ja tulosten esittämistavasta.

Mittausohjetta voidaan käyttää melun suunnittelu- ja tunnusarvojen (ohje ja raja-arvot) täyttymisen, sekä melumallinnuksilla saatujen tulosten vertailuun ohjeessa esitetyin rajoituksin. Ohjeen mukaisin menetelmin on lisäksi mahdollista selvittää melun mahdollinen kapeakaistaisuus, impulssimaisuus tai merkityksellinen sykintä (amplitudimodulaatio). Ohjetta voidaan lisäksi hyödyntää sellaisenaan tai yhdessä muun äänitekniikan viranomaisohjeistuksen kanssa tilanteissa, joissa tuulivoimaloiden melu aiheuttaa häiriötä ympäristössä tai rakennusten sisällä.

Mittausohjetta voidaan hyödyntää alueidenkäytön ja rakentamisen suunnittelussa tai ympäristövaikutusten arviointimenettelyssä melun vaikutusten ja melulle mahdollisesti altistuvien arvioinnissa.



Ympäristöministeriö  
Miljöministeriet  
Ministry of the Environment